



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Auswahl eines geeigneten Schweißverfahrens zur Integration in einen automatisierten Fertigungsprozess

Eruierung der anwendbaren Schweißverfahren zur
automatisierten Fügung von Franics-Turbinenschaufeln an ein
Lauftrad

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Burkhard Kittl

(E311 - Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Solmaz Mansour Fallah

0526321 (E740)

Schelleingasse 28-30/3/19

1040 Wien

Wien, im September 2014

Solmaz Mansour Fallah



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einen Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im September 2014

Solmaz Mansour Fallah

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Burkhard Kittl und Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Friedrich Bleicher bedanken. Ihre Unterstützung ermöglichte mir die Erstellung dieser Diplomarbeit am Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik der TU Wien. Besonders möchte ich mich bei Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Burkhard Kittl und Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Liedl bedanken, sie haben sich stets viel Zeit und Muße für meine Fragen und Anliegen genommen. Es war mir sowohl fachlich als auch menschlich eine Freude, mit ihnen zusammenarbeiten zu dürfen.

Mein spezieller Dank gebührt ganz besonders meinen Eltern und meinen beiden Schwestern, die mich in jedem Moment meines Studiums unterstützt haben und mir stets den nötigen Rückhalt schenkten.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen engen Freunden bedanken, die mich stets zur Ausdauer und Ausformung animiert haben.

„Per aspera ad astra“

Kurzfassung

Ziel dieser kompilatorischen Diplomarbeit ist es, eine Basis für das am IFT vollzogene Forschungsprojekt zu erarbeiten. Dabei ist die wesentliche Aufgabenstellung, die Ermittlung eines geeigneten Verfahrens für das automatisierte Verschweißen von Francis-Turbinenschaufel. Die Auswahl der möglichen Schweißverfahren wird auf Grund der Schweißbarkeit (Näheres zu diesem Begriff im Kapitel 2.3.) und der Automatisierungsmöglichkeit getroffen. Dabei wird auf die fertigungstechnischen Limitationen, die sich aus der expliziten Betrachtung der Forschungsprojekt relevanten Fertigung der Laufräder des Forschungspartners ergeben, eingegangen. Angesprochene Beschränkungen sind, das räumlich begrenzte Arbeitsumfeld und die Tatsache, dass dessen Konturen von außen nicht einsehbar sind. Der aktuelle Fertigungsprozess wird von Hand mit dem Wolfram-Inert-Gasschweißverfahren bzw., wenn es in späterer Folge der Raum zwischen den Schaufeln erlaubt, mit dem Metall-Aktivgas-Schweißverfahren durchgeführt. Es bedarf dabei nach Erstellung jeder Schweißnahtlage einer eingängigen Kontrolle. Bei der Schweißnaht handelt es sich um eine X-Naht mit mehreren Schweißlagen. Der so durchgeführte Fertigungsprozess bedarf drei Monate zur Fertigstellung eines Turbinenlaufrades mit beispielsweise 13 Schaufeln. Diese Dauer soll durch die Wahl eines geeigneten automatisierten Schweißverfahrens verkürzt werden.

Nach der Auswahl durch Einsatz einer qualitativen und quantitativen Fertigungsanalyse, wird mit der zweiten Kernkompetenz dieser Arbeit, der Umlegung der ausgewählten Verfahren auf automatisierbare Varianten (falls dies möglich ist) begonnen. Dabei wird der aktuelle „state of art“, die internationalen Publikationen und Produktlösungen von marktführenden Unternehmen herangezogen.

Abstract

The aim of this thesis is to present a basis for a research project with the company. The crucial task is to determine an appropriate method for the automated welding of Francis turbine blades. The choice of possible welding methods is based on the weldability (for more on this concept, see Capt. 2.3) and the possibility of automation. Furthermore, manufacturing limitations will also be taken into account: They result from the specific observation of the manufacturing of impellers by the company relevant to this research project. The limitation mentioned proves to be the space-constricted environment, and the fact that its contours are not visible from the outside. The current manufacturing process is performed by hand using the TIG welding method and requires a precise check after each creation of welding passes. The used weld seam is a X-multilayer type. The so-executed production process takes a month for the completion of a turbine impeller with 13 blades. This time shall be reduced by choosing an appropriate automated welding process.

After the selection, by applying qualitative and quantitative manufacturing analysis, the second core competency of this paper, which is the allocation of the selected process on automated varieties, will be commenced.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Grundlagen der Schweißtechnik.....	4
2.1	Allgemeine Begriffe	4
2.2	Schweißen von metallischen Grundwerkstoffen.....	5
2.3	Schweißbarkeit und ihre Unterbegriffe	7
2.4	Ausführung von Schweißnähten	8
2.5	Umwandlung des Grundwerkstoffes.....	11
2.5.1	Phasenumwandlungen von Metallen im Gleichgewicht.....	12
2.5.2	Eutektikum - vollständige Löslichkeit	16
2.5.3	Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild.....	18
2.6	Gefügeumwandlung in der Schweißnaht.....	20
2.7	Mögliche Schäden und Fehler einer Schweißnaht.....	22
2.7.1	Rissbildung	22
3	Wolfram-Inert-Gasschweißen	31
3.1	Einleitung	31
3.2	Verfahrensprinzip des WIG-Schweißens.....	32
3.2.1	Stromart und Polung.....	34
3.2.2	WIG-Plasmaschweißen	36
4	Metall-Aktivgas-Schweißen.....	38
4.1	Verfahrensprinzip des MAG-Schweißens.....	38
4.1.1	Einleitung.....	38
4.1.2	Allgemeine Funktionsweise	39
4.1.3	Anwendungsgebiet	53
5	Laserstrahlschweißen	54
5.1	Verfahrensprinzip des Laserstrahlschweißens.....	54
5.1.1	Einleitung.....	54
5.1.2	Emissionsentstehung.....	55
5.1.3	Allgemeine Funktionsweise eines Lasers	56
5.2	Gas-Laser	58
5.2.1	CO₂ -Laser.....	59

5.3	Festkörper-Laser	63
5.3.1	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser (Nd:YAG)	63
5.3.2	Dioden-Laser	65
5.4	Laserstrahlführung	65
5.4.1	Scannerschweißen (Remote-Laserschweißen)	69
6	Aufgabenstellung des Forschungsprojektes	70
6.1	Einleitung	70
6.2	Beschreibung des Fertigungsprozesses	71
6.3	Praktische Fertigung	74
6.4	Schwachstellenermittlung.....	74
7	Automatisierung	76
7.1	Einleitung	76
7.2	Automatisierung in der Schweißtechnik	77
7.2.1	Spannvorrichtungen.....	77
7.2.2	Roboter.....	78
7.2.3	Steuerung von Robotern.....	80
7.2.4	Programmierverfahren.....	81
7.2.5	Programmierfunktionen	82
7.2.6	Sensoren	82
7.3	WIG und MAG.....	87
7.4	Laser	91
7.4.1	Allgemeiner Aufbau einer Schweiß-Laseranlage	92
8	Ergebnisse und ihre Auswertung	95
9	Resümee und Ausblick	99
10	Anhang.....	100
10.1	Anhang A: Schweißdatenblatt.....	100
11	Literaturverzeichnis	102
11.1	Verwendete Literatur.....	102
12	Abbildungsverzeichnis.....	104
13	Tabellenverzeichnis.....	106
14	Abkürzungsverzeichnis.....	107

1 Einleitung

In den letzten Jahren durchlebte die Produktionsbranche einen stetigen Wandel in Richtung der Erhöhung des Automatisierungsgrades. Die Automation ist aus vielen Fertigungsverfahren mit dem heutigen Stand der Technik kaum wegzudenken, darunter auch Fügetechniken, wie die des Um- und Urformens. In dieser Arbeit wird mit Hilfe einer klar definierten Aufgabenstellung der aktuelle Status der Schweißautomation und ihre Anwendbarkeit auf diesen Projektfall geprüft. Dabei wird großer Wert auf die Verständlichkeit und Schlüssigkeit dieser Arbeit aus Sicht der Leser gelegt. Für diese Anforderung ist ein stufenweises Aufbauen des Verständnisses, somit der Bedarf der schrittweisen Abhandlung der Grundlagen unerlässlich. Es soll den Lesern zuerst ein Grundlagenverständnis über die nötigen Fertigkeiten und Anforderungen, sowohl an das Werkstück als auch an den Mensch und seine Arbeitsumgebung vermittelt werden. Dieser Einblick ermöglicht erst die vollständige Erfassung der technischen komplexen Aufgabenstellung.

In Kapitel 6 werden neben der genauen Konstruktion auch die Rahmenbedingungen des Unternehmens ausgearbeitet. Diese Erläuterung der Fertigungsbedingungen ist essentiell, um die Ergebniserarbeitung nachvollziehen zu können. Die Ergebnisse setzen sich aus zwei Bereichen zusammen: den Ergebnissen der Schweißverfahren und jenen der spezifizierten Schweißautomation.

Diese Arbeit stellt als kompilatorisches Werk im Rahmen einer Diplomarbeit den Anspruch auf wissenschaftliche Maßstäbe. Sie dient, auf einen vernünftigen Umfang beschränkt, der Erfassung und in Beziehung Setzung von Informationen. Diese Informationen sollen für weitere Erarbeitung von Projektergebnissen eine fundierte und adäquate Basis bieten. Zur Erlangung des Diplom-Ingenieur-Titels dienlich, stellt dieses Werk keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit, vielmehr soll es einen fundierten Grundstein für das projektbezogen notwendige Wissen über das Themengebiet der Schweißtechnik und speziell ihrer Automation legen. Zur Ermittlung der geeigneten Schweißverfahren wird von einem methodischen Vorgehen einer Fertigungsanalyse Gebrauch gemacht.

Der wesentliche Schwerpunkt liegt in der Spezifizierung der möglichen Automationsvarianten auf die Projektrahmenbedingungen, und zwar unter Zuhilfenahme des aktuellen „state of art“.

2 Grundlagen der Schweißtechnik

Auf Grund der großen Anzahl an aktuellen Schweißverfahren, kann hier nur auf eine für das Forschungsprojekt relevante kleinere Auswahl eingegangen werden. Im Folgenden wird den Lesern ein allgemeiner Überblick über das Metallschweißen und seiner begrifflichen Grundlagen gegeben.

2.1 Allgemeine Begriffe

Der Fertigungsprozess Schweißen zählt zur Gruppe der Fügetechniken. Der Begriff des Fügens wird in der DIN 8593-0:2003-09 wie folgt definiert:

„Das auf Dauer angelegte Verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff. Dabei wird jeweils der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt.“¹

Wie in der Abbildung 1 ersichtlich, sind diese Prozesse in neun Gruppen geteilt, wobei die vier wichtigsten Schweißen, Umformen, Kleben und Löten sind. Anzumerken ist, dass alle Verfahren des Fügens unlösbare Verbindungen darstellen.

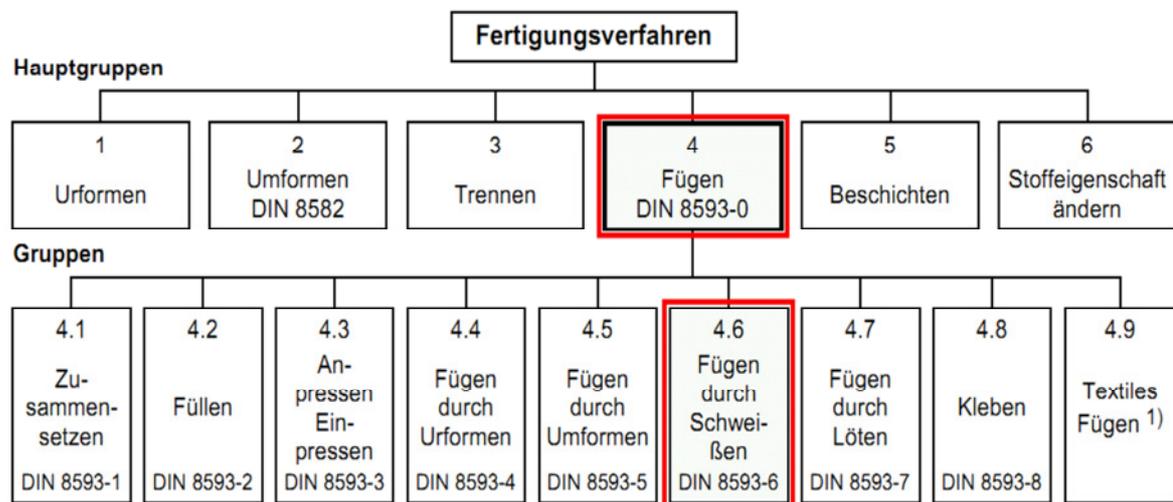


Abbildung 1: Übersicht der Fertigungsverfahren²

„Schweißen: Fügeprozess, bei dem zwei oder mehr Teile verbunden werden, wobei eine Kontinuität der Werkstoffe der zu verbindenden Teile hergestellt wird, unter

¹ „Norm DIN 8593 Teil 0 09.2003“ (Beuth Verlag GmbH, September 2003), 3.

² Ebd., 6.

Anwendung von Wärme oder Kraft oder beiden und mit oder ohne Schweißzusatzwerkstoff³

2.2 Schweißen von metallischen Grundwerkstoffen

Das Schweißen von metallischen Grundwerkstoffen wird in zwei Kategorien eingeteilt: in das Schmelzschweißen und das Pressschweißen. Der wesentliche Unterschied zwischen diesen beiden Verfahren ist die zusätzliche Aufwendung von äußerer Kraft, wie sie beim Pressschweißen gebräuchlich ist. In dieser Arbeit wird nicht weiter auf Verfahren des Pressschweißens eingegangen.

Im Falle des Schmelzschweißens wird der Grundwerkstoff aufgeschmolzen, häufig unter Beifügung eines sogenannten Schweißzusatzes. Dabei handelt es sich um einen (meist metallischen) Werkstoff der während des Schweißvorganges zu dem Grundwerkstoff hinzugefügt wird und zu einer Schweißnahtbildung beiträgt.⁴ Man bezeichnet ihn auch als Zusatzwerkstoff, der in Form von Schweißdrähten dem Grundwerkstoff beigemischt wird. Grundsätzlich können alle Werkstoffe, die sich in eine schmelzflüssige Phase überführen lassen durch Schweißen verbunden werden. Neben metallischen Werkstoffen zählen Thermoplaste oder Glas zu den häufig durch Schweißen verbundenen Materialien.

Die Wahl des idealen Schweißverfahrens ist von vielen Faktoren abhängig. Beispielsweise von der Art des zu verbindenden Grundwerkstoffes, der Belastungsart und -stärke, der die Schweißkonstruktion ausgesetzt werden soll und schließlich von der fertigungstechnischen Limitation. Bei dem Wechselspiel zwischen diesen drei äußeren Faktoren spricht man auch von dem sogenannten „Schweißtechnischen Dreieck“.

³ „Norm DIN 1910-100 02.2008“ (Beuth Verlag GmbH, Februar 2008), 4.

⁴ „DIN-Fachbericht CENTR 14599“ (Beuth Verlag GmbH, August 2005), 21.

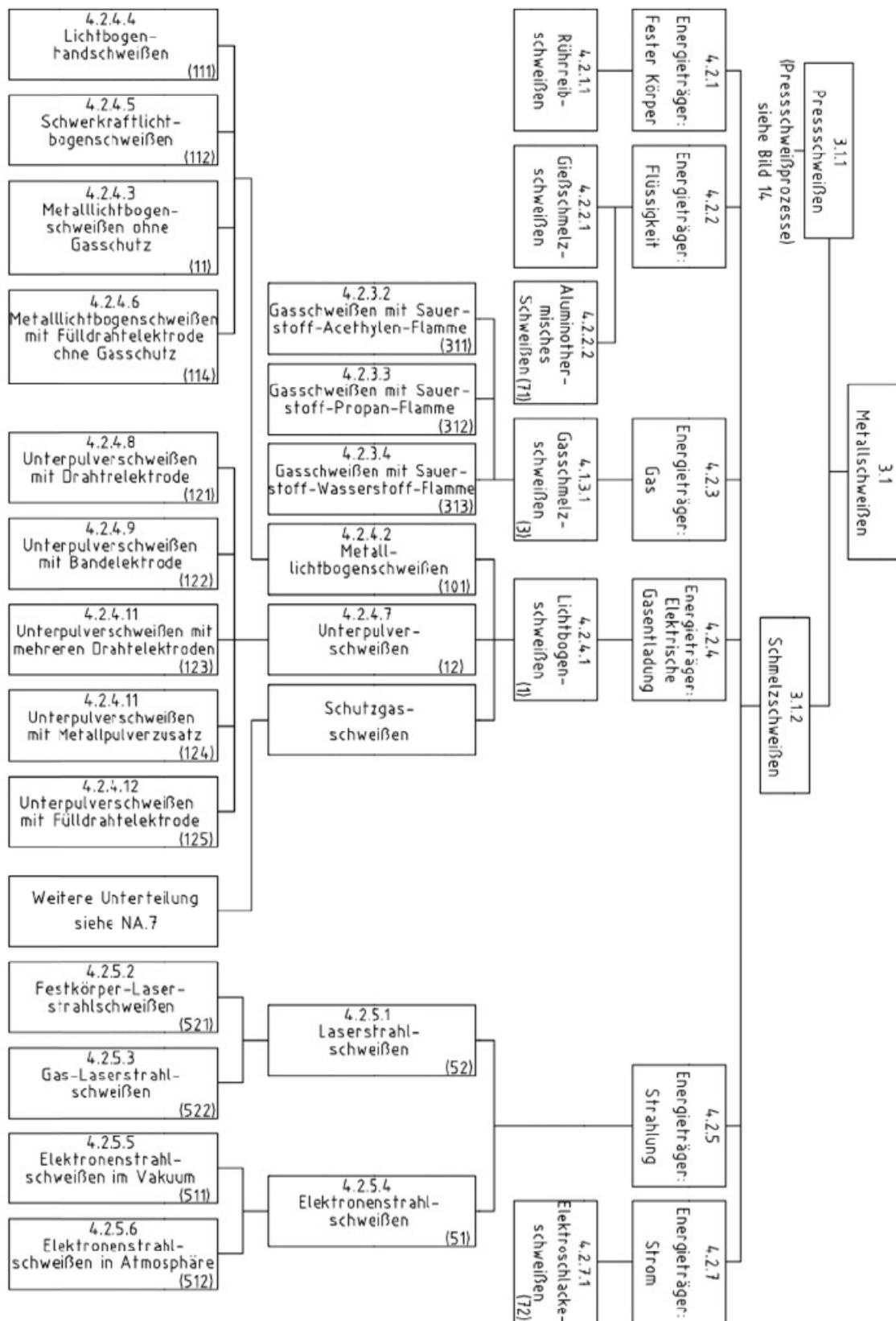


Abbildung 2: Gliederung Metallschweißen⁵

⁵ „Norm DIN 1910-100 02.2008“, 22.

2.3 Schweißbarkeit und ihre Unterbegriffe

Die in 2.2 genannten drei Faktoren werden in ihrer Gesamtheit unter den Begriff der „**Schweißbarkeit**“ eines Bauteils zusammengefasst. Sie gibt Auskunft darüber, ob ein Bauteil auf Grund seiner äußeren Faktoren durch die Schweißtechnik gefügt werden kann oder nicht. Abbildung 3 verbildlicht diese gegenseitige Beeinflussung.

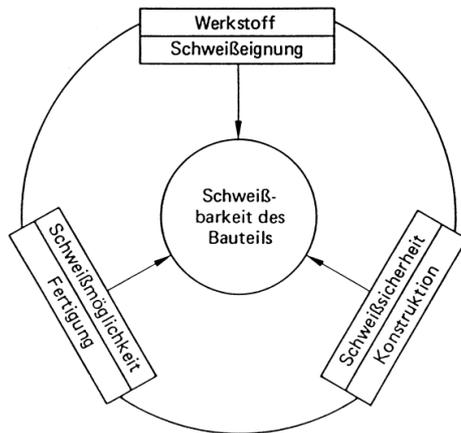


Abbildung 3: Schweißtechnisches Dreieck⁶

Oftmals wird im alltäglichen Sprachgebrauch fälschlicherweise die Schweißbeignung mit der Schweißbarkeit gleich gesetzt. Dabei bezieht sich die **Schweißbeignung** nur auf einen der drei äußeren Faktoren, nämlich den Werkstoff. Erlangt wird sie, wenn der für das Bauteil ausgewählte Grundwerkstoff mit einem dafür geeigneten Schweißverfahren geschweißt

werden kann, sodass es zu keinen wesentlichen Beeinträchtigungen der Werkstoffeigenschaften kommt. Wesentlich an dieser Bedingung ist, dass es durch die mit dem Schweißen einhergehende Wärmeentwicklung zu einer lokalen Aufhärtung des Werkstoffes kommen kann, welche das Risiko einer Versprödung mit sich bringt (mehr dazu im Kapitel 2.5 „Umwandlung des Grundwerkstoffes“).

Die Fertigung einer Schweißnaht selbst stellt auch eine Limitierung dar, auf welche Rücksicht genommen werden muss. Eine zu erfüllende Voraussetzung in diesem Zusammenhang ist die geeignete Auswahl eines Schweißverfahrens nach wirtschaftlichen und vor allem nach verfahrenstechnischen Aspekten. Bei Erfüllung aller fertigungstechnischen Anforderungen, wird von dem übergeordneten Begriff der **Schweißmöglichkeit** gesprochen. Dabei muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass diese sowohl den Einfluss einer Nahtvorbereitung, der Bauteilvorwärmung, Schweißzusatzwahl, Schweißfolge sowie der Nachbehandlung der Schweißnaht berücksichtigt.

Die detaillierte Erläuterung dieser Begriffe soll den Lesern vor Augen führen, dass die Auswahl eines Schweißverfahrens von vielzähligen Faktoren abhängig ist, und stets eine für das Bauteil speziell zugeschnittene Fügelösung darstellt. In späteren Kapitel wird dabei auch auf die Notwendigkeit von langjähriger Erfahrung, wie sie speziell von Schweißern benötigt wird, eingegangen.

⁶ Ulrich Dilthey, *Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen* (Berlin [u.a.]: Springer, 2005), 12.

2.4 Ausführung von Schweißnähten

Die Stoßart, die Nahtart, sowie die Anzahl der Nähte und ihre Positionen auf dem Werkstück sind sorgfältig zu wählen. Für eine hohe Schweißsicherheit, ist es unter anderem wesentlich die Grundregel der Nahtanordnung zu befolgen. Die Anzahl der Schweißnähte ist möglichst gering zu halten. Die Nähte selbst sollten nicht an den Stellen höchster oder ungünstiger Beanspruchung liegen. Auf jeden Fall sind je nach Möglichkeit Nahtkreuzungen zu vermeiden. Die Schweißsicherheit ist aber auch Fertigungsbedingt und wird vorwiegend durch die Vorbereitung zum Schweißen garantiert. Dazu zählen neben dem Schweißverfahren und dem Zusatzwerkstoff, die hier besonders hervorgehoben Begriffe der Stoßart, Nahtart und Fugenform.

Im ersten Schritt ist die notwendige Anzahl der Schweißnähte aufgrund der Konstruktion und den vorherrschenden Belastungen zu wählen. Dabei sei darauf zu achten, dass diese möglichst klein bleibt, um die Festigkeit des Werkstückes nicht zu gefährden. Denn unabhängig von der Güte einer Schweißnaht, stellt diese einen kritischen Bereich in der Festigkeitsrechnung dar. Im Anschluss wird die Position der Schweißnaht festgelegt. Wichtig ist dabei, dass die Nahtabstände so groß sein müssen, dass eine gegenseitige Beeinflussung ausgeschlossen werden kann. Ein zu knapper Abstand zwischen zwei Schweißnähten führt zu einer erhöhten Eigenspannung. Hierbei ist ein besonderes Augenmerk auf das zur Fertigung zu verwendende Schweißverfahren zu legen. Die Position muss sowohl den vorherrschenden Beanspruchungen, als auch der Wirtschaftlichkeit bzw. Machbarkeit der Fertigung genügen. In der folgenden Abbildung 4 sind einige mögliche Nahtpositionen illustriert. Zu einem späteren Zeitpunkt (Kapitel 6) wird gezeigt, dass eben diese Nahtposition ein entscheidendes Hindernis für eine Prozessveränderung sein kann. Nach der Festlegung der Position der Schweißnaht ist die Stoßart zu wählen.

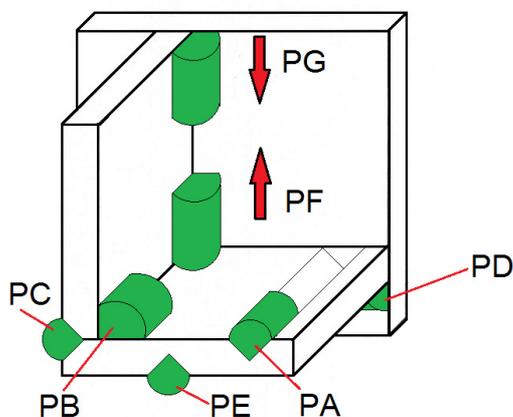


Abbildung 4: Nahtpositionen

Tabelle 1: Schweißen und verwandte Prozesse - Schweißpositionen (ISO 6947:2011); Deutsche Fassung EN ISO 6947:2011

Bezeichnung laut EN ISO 6947:2011	
PA	Wannenposition
PB	Horizontalposition
PF	Steigposition
PG	Fallposition
PC	Querposition
PE	Überkopfposition
PD	Horizontalposition - Überkopfposition

Man bezeichnet den Bereich, an dem die Teile miteinander durch Schweißen gefügt werden als *Schweißstoß*. Hierbei werden verschiedene Stoßarten unterschieden. Als Kriterium für diese Einteilung dient die konstruktive Anordnung der zu fügenden Teile zueinander. So sind beispielsweise häufig auftretende Stoßarten der Stumpf- oder T- bzw. Eckstoß. Weniger häufig Gebrauch findet der Überlapp-, Parallel-, Doppel-T-, Schräg-, Mehrfach- oder Kreuzstoß (Abb.5). Sie sind mitbestimmend für die Wahl der Nahtart und werden in der Norm DIN EN ISO 17659:2004 beschrieben.

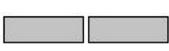
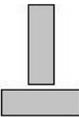
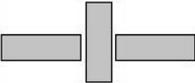
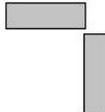
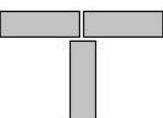
	<p>Stumpfstoß</p> <p>Die Teile, die in einer Ebene liegen, stoßen stirnseitig gegeneinander.</p>		<p>Überlappungsstoß</p> <p>Die Teile liegen flächig und sich überlappend aufeinander.</p>
	<p>Parallelstoß</p> <p>Die Teile liegen flächig und parallel aufeinander.</p>		<p>T-Stoß</p> <p>Ein Teil stößt senkrecht mit seiner Stirnseite auf das andere Teil.</p>
	<p>Kreuzstoß</p> <p>Zwei Teile, die in einer Ebene liegen, stoßen stirnseitig und im rechten Winkel gegen ein 3., dazwischenliegendes Teil.</p>		<p>Eckstoß</p> <p>Zwei Teile stoßen an ihren Enden in einem Winkel gegeneinander.</p>
	<p>Mehrfachstoß</p> <p>Mehrere Teile stoßen stirnseitig gegeneinander.</p>		<p>Schrägstoß</p> <p>Ein Teil stößt mit seinem Ende schräg gegen das andere Teil.</p>

Abbildung 5: Stoßarten⁷

Abhängig davon für welche Stoßart man sich entschieden hat, wird aus den möglichen Nahtarten eine dem Zweck dienliche ausgewählt. Die nachfolgende Tabelle macht sowohl die Reihenfolge als auch die Abhängigkeit der zuerst getroffenen Wahl deutlich (Tab. 2). Diese Tabelle erhebt dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll nur einige der häufigsten Stoßarten und ihre passenden Fugenformen verdeutlichen. Man wählt die Fugenform so, dass die Schweißgutmenge bei der Aufschmelzung der Fugenflanken möglichst klein ausfallen soll. Dabei muss auch berücksichtigt werden, ob eine Mehr-Lagen-Schweißung notwendig wird, oder die zu bevorzugende Ein-Lagen-Schweißung ausreicht. Mehr-Lagen-Schweißungen werden bei höheren Querschnitten notwendig und bedürfen nach jeder Lage einer Nachbearbeitung. Diese setzt sich aus dem

⁷ „Schweißen Tabellen und Diagramme > Anleitungen und Tipps“, zugegriffen 6. August 2014, <http://www.anleitung-zum-schweissen.de/schweissen-tabellen-und-diagramme/>.

Abschleifen und Normalglühen und einer visuellen Kontrolle (Röntgen auch möglich) bzw. eventuell anfallenden Korrektur zusammen.

Tabelle 2: Übersicht einiger Stoßarten mit passenden Nahtarten und Fugenformen

Stoßart	Nahtart	Fugenform
Stumpfstoß	Stumpfnah	I-Naht bzw. I-Fuge
		V-Naht bzw. V-Fuge
		Y-Naht
		U-Naht
		DV-Naht (X-Naht)
		Sonderformen
T-Stoß (teilweise Eck- oder Winkelstoß)	Stutzennaht	HV-Naht
		HY-Naht
		DHV-Naht
		DHY-Naht
		Sonderformen
	Kehlnaht	HV-Naht
		HY-Naht
		DHV-Naht
	Überlappungsstoß	Muffennaht

Die einfachste und am häufigsten verwendete Fugenform ist die I-Naht, auch I-Fuge genannt. Für eine höhere Belastung ist im Allgemeinen ein Nachschweißen der Naht auf der Wurzelseite notwendig.

Die V-Naht wird zum Verschweißen von zwei ungleich starken Blechen verwendet. Dabei wird zur Herabsetzung der Winkelschrumpfung ein Öffnungswinkel kleiner als 60° anvisiert. Bei den teil- und vollmechanisierten Schweißverfahren sind auch kleinere Öffnungswinkel möglich.

Bei größeren Blechdicken, als bei der V-Naht möglich, findet die doppelte V-Naht oder auch die X-Naht Verwendung, denn bei gleichem Öffnungswinkel wird nur die halbe Schweißgutmenge gebraucht. Um einen Verzug durch die Winkelschrumpfung zu vermeiden, wird stets nach jeder Lage abwechselnd von oben und unten geschweißt.

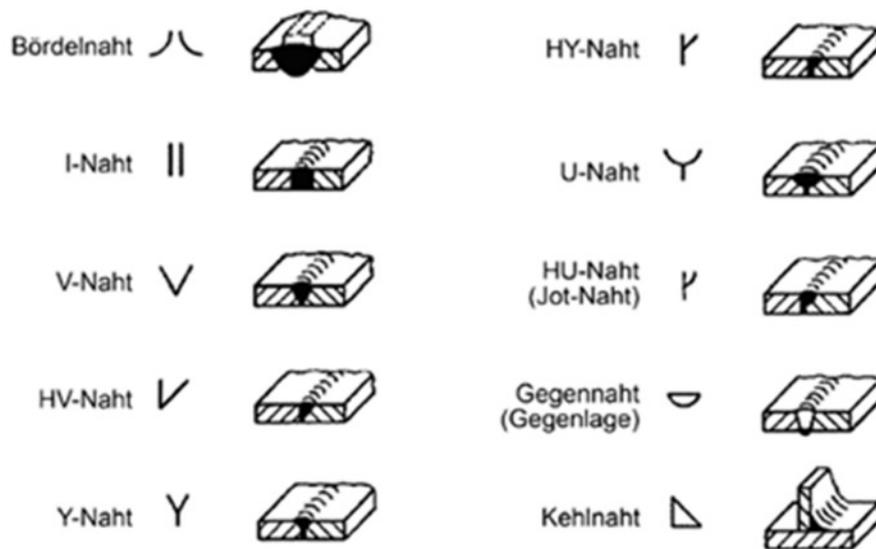


Abbildung 6: Überblick der Schweißnahtformen

2.5 Umwandlung des Grundwerkstoffes

Aus der Industrie, wie wir sie heute kennen, ist Stahl als Werkstoff nicht wegzudenken, sei es nun zum Einsatz in Gebäuden, Maschinen und Werkzeugen aller Art. Stahl und seine verschiedenen Sorten sind vielseitige Werkstoffe und werden laut DIN EN 10020:2000-07 wie folgt definiert:

„Werkstoff, dessen Massenanteil an Eisen größer ist als der jedes anderen Elementes, dessen Kohlenstoffgehalt im Allgemeinen kleiner als 2 % ist und der andere Elemente enthält.“

Ihre Vielseitigkeit verdanken sie ihrer Umwandlungsfähigkeit, das heißt durch gezielte Wärmebehandlungen können Anforderungen für spezielle Einsatzzwecke erfüllt werden. Dabei wird die chemische Zusammensetzung des Stahls nicht verändert, wobei aber durch eine gezielte Zugabe von Legierungselementen Eigenschaften des Stahles verstärkt oder verringert werden können. Elemente der Legierungen sind vielfältig. Von besonderer Bedeutung für Eisen ist dabei der Kohlenstoff. Sein Gehalt legt die wichtigsten Eigenschaften von Stahl fest und wird daher in DIN EN 10020 definiert.

Um den Lesern ein fundiertes Wissen über die Umwandlung des Grundwerkstoffes (in unserem Fall austenitischer Stahl) während des Schweißvorganges zu geben, folgt eine kurze Abhandlung hierüber.

2.5.1 Phasenumwandlungen von Metallen im Gleichgewicht

Von einer Phase spricht man, wenn innerhalb eines Bereich eines Mediums die gleichen physikalischen und chemischen Eigenschaften herrschen, wie beispielsweise: flüssig, fest, Druck (p), Temperatur (T), etc.

Wie bereits erwähnt genießen Legierungen heute eine große Bedeutung, da sie gegenüber reinen Metallen eine Vielzahl von Vorteilen aufweisen. Eine Legierung ist ein Metall, welches aus mindestens zwei Komponenten (reine Metalle oder mineralische Zusätze) zusammengesetzt ist. Dabei ist das Verhältnis zwischen diesen Komponenten für die Klassifizierung einer Legierung als solche nicht ausschlaggebend, sie spielt aber neben den Komponenten eine wesentliche Rolle für die chemische und physikalische Eigenschaft der Legierung. Ein großer Vorteil der Metalle ist ihre Umwandlungsfähigkeit bei gezielter Wärmebehandlung und die damit verbundenen Eigenschaftsänderungen. Der Zustand eines reinen Metalls lässt sich in einem Zustandsschaubild als von Temperatur T , Druck p und Konzentration c abhängig beschreiben. Dabei treten drei Aggregatzustände auf, also fest, flüssig, dampfförmig (siehe Abb.7). Eine Phase ist ein homogener Bereich in dem überall die gleichen chemischen und physikalischen Eigenschaften gelten. Diese unterschiedlichen Phasen werden im p - T -Diagramm durch die Phasengrenzlinien voneinander abgegrenzt, wobei sich im Tripelpunkt, dem Schnittpunkt der drei Linien, die drei Phasen im Gleichgewicht befinden.

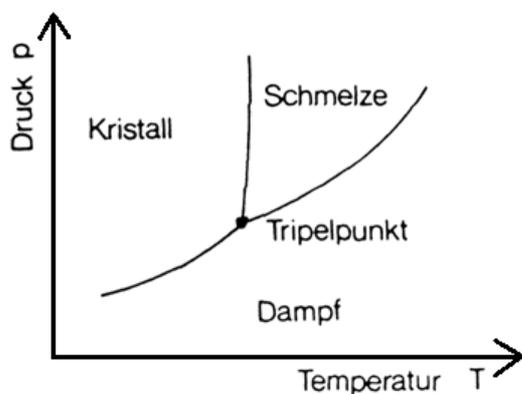


Abbildung 7: p-T-Diagramm eines Einstoff-Systems mit beschrifteten Phasen

Legierungen, genauer Mehr-Komponenten-Systeme, sind in der Praxis von größerer Bedeutung als Einstoffsysteme. Zur weiteren Erläuterung sollen hier Zweistoffsysteme (auch binäre Systeme genannt), wie auch Stahl eines ist, herangezogen werden. In einem binären System werden die auftretenden Phasen in Abhängigkeit des Mischungsverhältnisses der Komponente A zur Komponente B als Funktion der Temperatur aufgetragen. Das ist auch der wesentliche Unterschied dieser Systeme zu Einkomponenten-Systemen, in denen die Konzentration immer konstant ($c = 1$, da nur ein Stoff vorhanden) ist. Die Konzentration eines binären Systems bezieht sich dabei auf einen Prozentsatz der Gesamtmasse. Sie wird auf der Abszisse eingezeichnet und erreicht beispielsweise bei der Komponente A ihr Maximum im Ursprung (100%) und ihr Minimum an der maximalen Konzentration der Komponente B. Bei Zweikomponenten-Systemen steht die Phase speziell für identische physikalische Eigenschaften und chemische

Zusammensetzungen von Gefügebestandteilen (z. B. α -Phase (Ferrit) im Fe-C-Diagramm).

Bei Zwei- oder Mehrkomponentensystemen wird im Zustandsschaubild der Druck p nicht berücksichtigt. Grund dafür ist, dass dieser bei technischen Vorgängen fast immer konstant ist und in etwa bei einem Bar liegt. Somit hat er auf die Umwandlung in der flüssigen und festen Phase so gut wie keinen Einfluss.

Die Abb. 8 zeigt ein Zustandsschaubild zweier Komponenten, hier mit A und B bezeichnet. TSA bezeichnet die Schmelztemperatur der reinen Komponente A, sowie TSB das selbige für die Komponente B tut. Das rechte Zeit-Temperatur Diagramm stellt die Abkühlungskurve der Legierung L1 dar. Die Legierung L1 selbst setzt sich in diesem Fall wie im linken Zustandsdiagramm (dem Konzentrations-Temperatur-Diagramm) an der Konzentrationsmarke c_0 ersichtlich ist, aus 50% A und 50% B zusammen. Die Abkühlungskurve der Legierung L1 (T-t-Diagramm), hat anders als bei reinen Metallen, keinen Haltepunkt. Wenn bei der Abkühlung eines reinen Metalls eine Änderung des Aggregatzustandes eintritt, ist diese Änderung in der Abkühlungskurve als Haltepunkt ersichtlich. Dabei muss die Schmelze am Erstarrungspunkt (Haltepunkt) Wärme abgeben, sodass die Temperatur an dieser Stelle längere Zeit konstant bleibt. Zu sehen ist ein solcher Haltepunkt bei reinen Metallen, als ein kurzzeitig zur Abszisse paralleler Verlauf der Abkühlungskurve.

In unserem illustrierten Fall handelt es sich um eine Legierung, welche eben diesen Haltepunkt nicht besitzt. Legierungen weisen stattdessen immer zwei Knickpunkte (hier bei T_1 und T_2 ersichtlich) auf. Zwischen diesen Punkten verläuft die Kurve deutlich flacher, da in diesem Temperaturbereich die Abkühlung langsamer von statten geht. Daraus erschließt sich auch der große Unterschied der Abkühlung einer Legierung zu der eines reinen Metalles: Die Schmelze einer Legierung erstarrt nicht bei einer bestimmten Temperatur, sondern in einem bestimmten Temperaturbereich. In diesem genannten Schmelzbereich besitzen Legierungen einen als teigig zu bezeichnenden Zustand, also teils flüssig teils fest.

Der obere Knickpunkt bei T_1 ist der Beginn und der untere Punkt bei T_2 das Ende der Erstarrung. Wie die Abb. 8 verständlich macht, nennt man den oberen Knickpunkt „Liquiduspunkt“ und den unteren „Soliduspunkt“. Bei der gleichen Temperatur T_1 befindet sich also die Legierung L1 mit der Konzentration c_0 genau auf der Liquiduslinie (linkes Diagramm). Vice versa trifft die L₁ bei T_2 genau auf die Soliduslinie.

Würde man nun alle Halte- bzw. Knickpunkte einer Vielzahl von Legierungen mit verschiedenen Konzentrationen zusammensetzen und in das Konzentrations-Temperatur-Diagramm für A und B eintragen, so erhielte man zwei kontinuierliche Linien: Die Liquiduslinie, oberhalb ihr sind alle Legierungen flüssig (der Bereich wurde mit S für Schmelze bezeichnet), und die Soliduslinie, unter ihr sind alle

Legierungen in einem festen Aggregatzustand. Bei dem letzteren Bereich spricht man von dem Bereich der Mischkristalle, welche ihren Namen der Tatsache verdanken, dass sich auch in festem Zustand die Bestandteile (hier A und B) vieler Legierungen mischen können, man spricht von festen Lösungen, oder von der Bildung von Mischkristallen. Den Bereich zwischen Solidus- und Liquiduslinie nennt man Zwei-Phasengebiet, in welchem Schmelze und Mischkristalle im Gleichgewicht nebeneinander vorkommen. Wenn man nun eine isotherme Linie ($T = \text{konstant}$) wie es beispielsweise die Linie T_3 ist (blau) aufstellt, so nennt man den Bereich dieser Linie zwischen Solidus und Liquiduslinie „Konode“. Die Konode schneidet die Liquiduslinie bei der Konzentration c_2 und die Soliduslinie bei der Konzentration c_1 . Dies bedeutet, dass die Restschmelze bei der Temperatur T_3 einen Anteil c_2 an B und der entstehenden Mischkristalle einen Anteil c_1 an B hat.

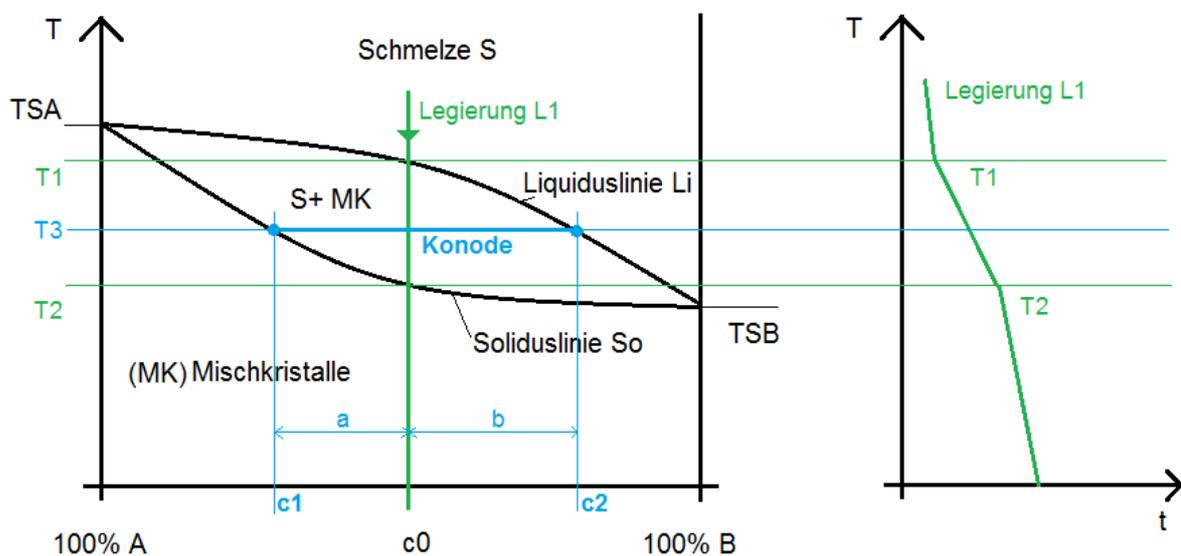


Abbildung 8: Zustandsdiagramm eines Zweikomponentensystems

Es sei angemerkt, dass Zustandsdiagramme für thermodynamisches Gleichgewicht gelten, also für eine unendlich lange Abkühlzeit. Diese unendliche Abkühlzeit ermöglicht den ausgeschiedenen Mischkristallen, ihre Konzentrationsunterschiede über Diffusionsvorgänge auszugleichen. Daher ist in solchen Zustandsdiagrammen am Ende der Erstarrung ein vollkommen homogener Mischkristall möglich. In der Regel erfolgt die Erstarrung eines Metalls (technische Abkühlung) nicht unendlich langsam und fördert somit einen Konzentrationsunterschied innerhalb der Kristallite (Abb. 9). Legierung L wird abgekühlt und somit bilden sich bei der Temperatur T_1 Kristallkeime mit der Konzentration c_1 . In Folge einer weiteren langsamen Abkühlung bilden sich um diese Keime wachsende Kristalle mit den Konzentrationen c_2 . Dabei sei angemerkt, dass diese nicht nach der Soliduslinie, also dem thermodynamischen Gleichgewicht sondern nach der „technischen Abkühlung“ verlaufen. Daher lagern sich Kristalle einer anderen Konzentration (hier c_2) und die anfänglichen

Kristallkeime an. Würde nun die Abkühlung unendlich langsam von statten gehen, sonst könnten Konzentrationsunterschieden zwischen den bei T_1 erstarrten Kristallkeimen und den bei T_2 erstarrten Mischkristallen durch die Diffusion ausgeglichen werden.

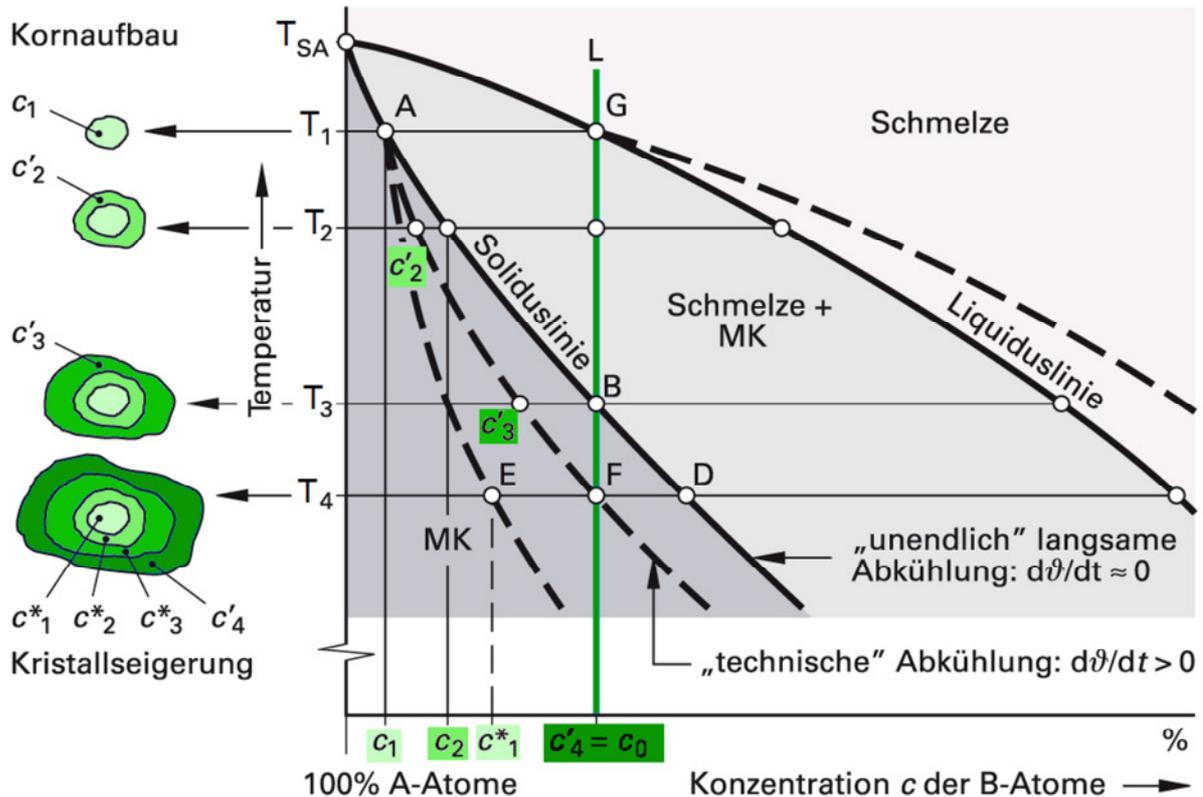


Abbildung 9: Kristallseigerung⁸

Bei unendlich langsamer Abkühlung ändern die um diese Kristallkeime wachsenden Kristalle ihre Zusammensetzung entlang der Soliduslinie (hier eingezeichnet entlang Punkt A-B-D). Es sollten in diesem Fall alle bei Temperatur T_2 ausgeschiedenen Mischkristalle aus der Schmelze eine Zusammensetzung c_2 besitzen und die Restschmelze eine an der Komponente B-reicheren Konzentration. Wir erinnern uns an die Konode aus der vorherigen Abbildung. Dies ist aber bei einer technischen Abkühlung nicht möglich, da dafür die beispielsweise bei T_1 ausgeschiedenen Kristalle eine bestimmte Menge an A Komponenten abgeben und eine bestimmte Menge an B Komponenten aufnehmen müssten (Diffusion). Die relativ kurze Abkühlungszeit macht dies unmöglich. Es ist dadurch ersichtlich, dass die umliegenden Kristalle eine Konzentration von c_2' statt c_2 (Punkt auf Soliduslinie) besitzen. Es ist erkennbar, dass bei technischer Abkühlung die praktische Erstarrungslinie eine nach unten verschobene Soliduslinie darstellt. Man kann über dies hinaus auch erkennen, dass bei der Temperatur T_3 die Legierung L (Punkt B) bereits vollständig wäre. Auf Grund der fehlenden Diffusionsmöglichkeit tritt dies

⁸ Volker Läßle, *Werkstofftechnik Maschinenbau theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen ; [neue europäische und internationale Normen]* (Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer, 2013), 78.

tatsächlich erst bei T_4 (Punkt F) ein. Dabei haben die zuletzt ausgeschiedenen Mischkristalle eine Zusammensetzungskonzentration c_4' bzw. c_0 . Der dabei entstandene Gefügebau besteht aus schichtförmig aufgebauten Körnern mit einem sich vom Kern hinaus kontinuierlich verändernden B-Gehalt. Dieses Phänomen bezeichnet man als „Kristallseigerung“, wobei das Wort „Seigern“ ein sich Abtrennen bzw. sich vom übrigen Absetzen bedeutet. Diese Seigerungserscheinungen sind nicht völlig vermeidbar, können aber abgeschwächt werden. Für diese Arbeit spielt die Seigerung insofern eine wichtige Rolle, als dass beim Schweißprozess kurze Schmelz- und Abkühlzeiten vorliegen. Dabei haben die durch das Seigern hervorgerufenen Konzentrationsunterschiede einen starken Einfluss auf die mechanischen und dynamischen Werkstoffeigenschaften. Unterstreichen lässt sich dies, wenn man bedenkt unter welchen Umständen die Kristallseigerung ihre größte Ausprägung erreicht:

1. Bei großen Abkühlgeschwindigkeiten, wie sie beim Schweißen auftreten
2. Je kleiner die Diffusionsgeschwindigkeit der beteiligten Elemente ist (austenitischer Stahl)
3. Je ausgedehnter das Erstarrungsintervall (Differenz zwischen Liquidus- und Solidustemperatur einer Legierung)

So entstehende Versprödungen müssen durch eine nachfolgende Wärmebehandlung beseitigt werden, diese nennt man Diffusions- oder Ausgleichsglügen.

2.5.2 Eutektikum - vollständige Löslichkeit

Das in Abbildung 8 zuvor gezeigte binäre Zustandsschaubild verdeutlicht, dass sich die Solidus- und Liquiduslinie durch die Aneinanderreihung der einzelnen Knick- bzw. Haltepunkte konstruieren lässt.

Wird nun die gesamte Bandbreite an Legierungsmöglichkeiten (verschiedene Konzentrationsverhältnisse) von A100% bis hin zu B100% gereiht, und ihre Knick- bzw. Haltepunkte wie zuvor beschrieben übertragen, so entsteht ein Zustandsdiagramm wie in Abb.10. Wie bereits erklärt, besitzen die Abkühlungskurven reiner Metalle Haltepunkte und jene der Legierungen zwei Knickpunkte. Abbildung 10 zeigt, das Zustandsdiagramme von Bismut (Bi) und Cadmium (Bi-Cd), diese zwei Stoffe sind im flüssigen Aggregatzustand vollkommen löslich und im festen Zustand nicht. Reiht man nun alle Abkühlungskurven auf, so wird deutlich, dass die Legierung L_3 keinen Knickpunkt aufweist. Die Bedeutung jener speziellen Abkühlungskurve ist, dass bei einer bestimmten Temperatur (in diesem Fall 144°C) die Erstarrung beginnt, sprich sich hier der Liquiduspunkt befindet. Gleichzeitig findet sich aber auch der Soliduspunkt also der Haltepunkt bei jener Temperatur, und somit endet auch hier die Erstarrung. Der Abkühlungsprozess der

Legierung L_3 verläuft somit wie die eines reinen Metalles, wobei der Unterschied darin liegt, dass sich bei der Erstarrung zwei Arten von Kristallen bilden, CD- und Bi-Kristalle.

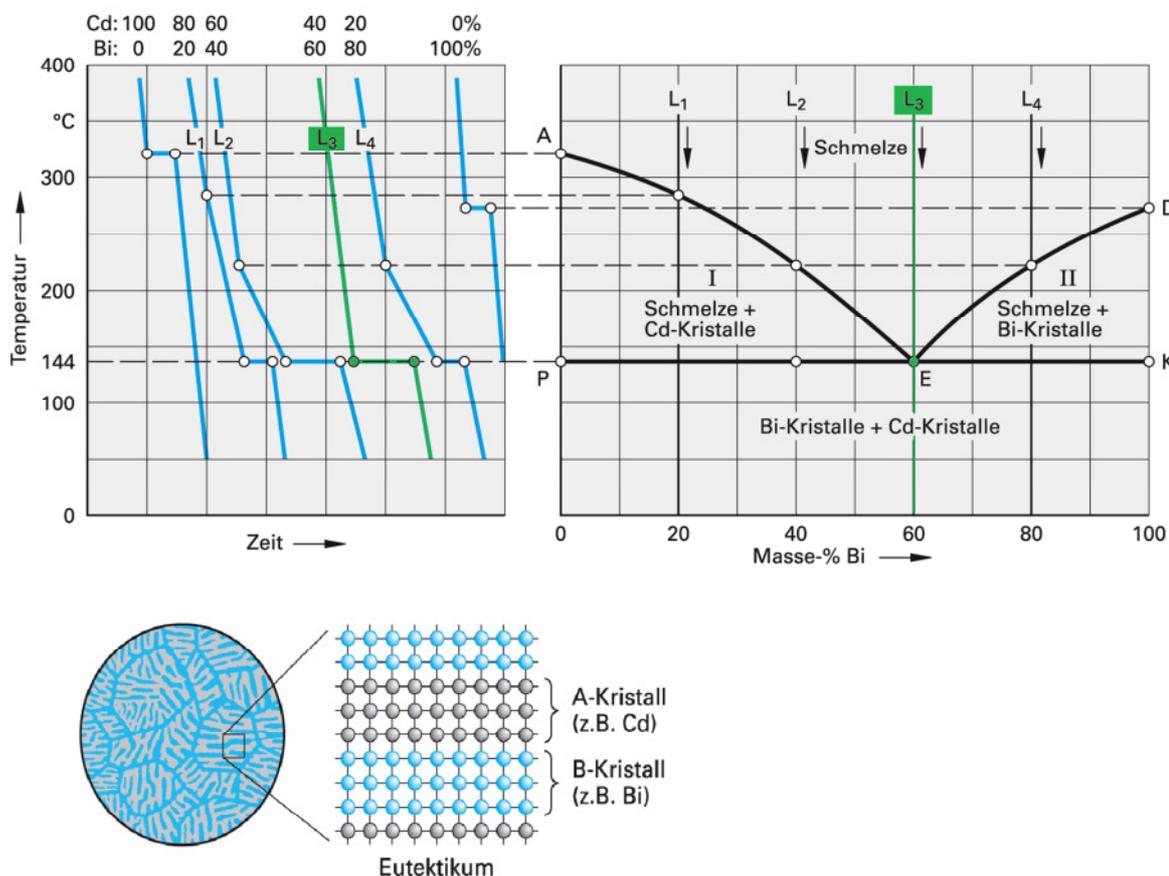


Abbildung 10: Eutektikum, Abkühlungskurven und Zustandsdiagramm einer im flüssigen Zustand vollkommen mischbarem, aber nicht im festen Zustand eines binärem System⁹

Die sich bildende Gefügestruktur geht also aus einer eutektischen Reaktion hervor, wobei man das Gefüge selbst als „Eutektikum“ und die Legierung L_3 speziell als „eutektische Legierung“ bezeichnet.

Wenn man eine andere Legierung, beispielsweise L_1 betrachtet, so zeigt sich ihr Schnittpunkt mit der Liquiduslinie bei ca. 270°C, wo zunächst nur Cd-reiche Kristalle ausgeschieden werden. Bei der eutektischen Temperatur von 144°C ist in der Restschmelze nur noch ein CD-Gehalt von 40% verbleibend (anfänglich 80%). Dies entspricht dem Verhältnis der eutektischen Legierung, daher setzt auch eine eutektische Reaktion ab diesem Punkt ein und es werden gleichzeitig reine Cd- bzw. Bi-Kristalle ausgeschieden. Die Abbildung 10, eines Gefüges und seiner Gitterstruktur eines Eutektikums, verdeutlicht den besonderen Aufbau. Die streifenförmige und abwechselnde Ausscheidung erfolgt nur dann, wenn die Restschmelze die benötigte Zusammensetzung des Eutektikums erreicht hat. Wenn

⁹ Ebd., 80.

nun eine Legierung einen größeren Bi-Anteil besitzt, werden zunächst nur Bismutkristalle ausgeschieden, bis die Restschmelze durch den sinkenden Bi-Gehalt das eutektische Verhältnis erreicht hat. Dies geschieht in diesem Fall bei einer Temperatur von 144°C, also am Schnittpunkt der in Abb.10 eingezeichneten Isothermen mit den jeweiligen Legierungen.

2.5.3 Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild

Um die Gefügeumwandlungen in einer Schweißnaht vollständig erfassen zu können ist das Verständnis über die Gefügeformen von Eisen-Kohlenstoff Legierungen unerlässlich. Dieses Wissen soll nun mit Zuhilfenahme des zuvor Erklärten vermittelt werden. Die Abbildung 11 macht deutlich, dass das Gefüge von Fe-C-Legierungen verschiedene Gefügestrukturen in Abhängigkeit des Kohlenstoffgehaltes und der Temperatur zulässt.

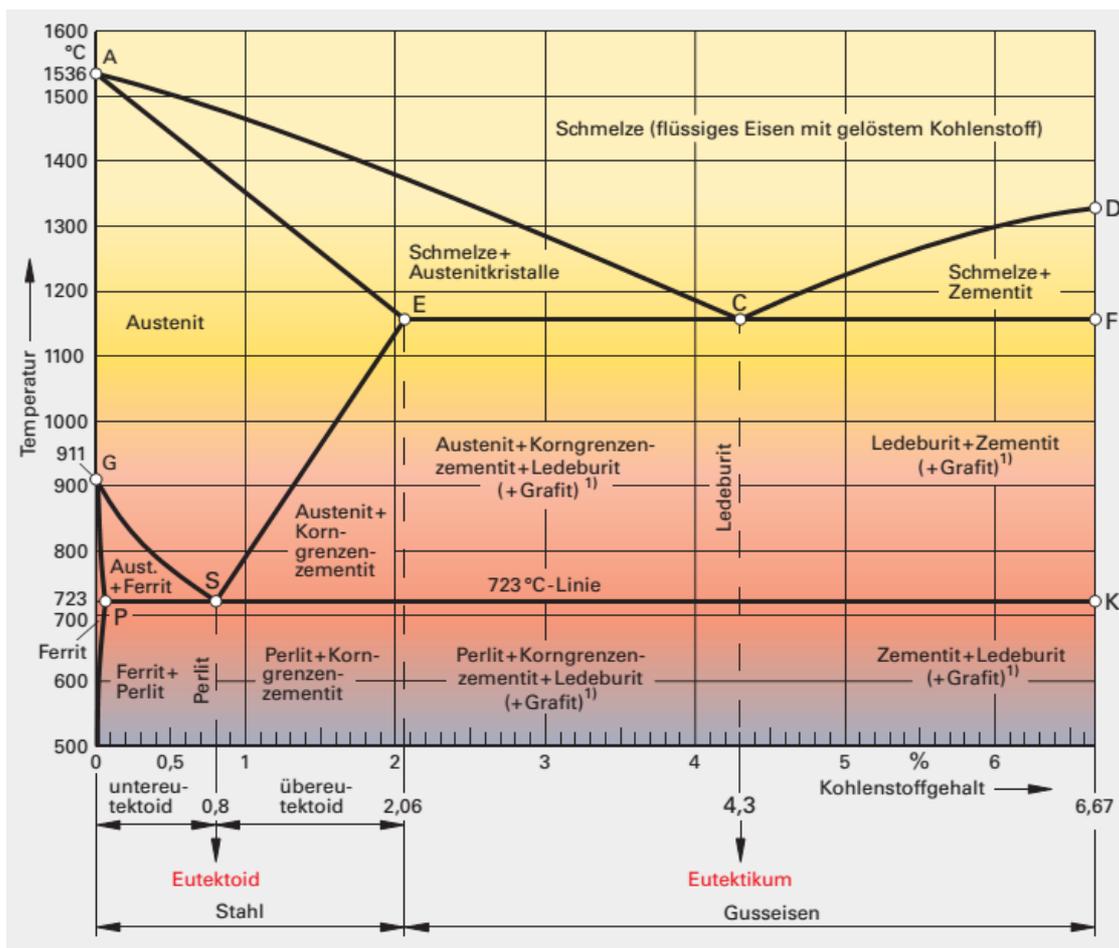


Abbildung 11: Gesamtes Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm mit den Glühfarben im Hintergrund¹⁰

¹⁰ Ulrich Fischer, *Tabellenbuch Metall* (Haan-Grüten: Verl. Europa-Lehrmittel, 2011), 152.

Stahl besitzt einen Kohlenstoffgehalt, der zwischen 0% und 2,06% liegt, darüber hinaus mit Kohlenstoff angereichertes Eisen wird als „Gusseisen“ bezeichnet (siehe Abb.11 auf der rechten Seite der Abszisse).

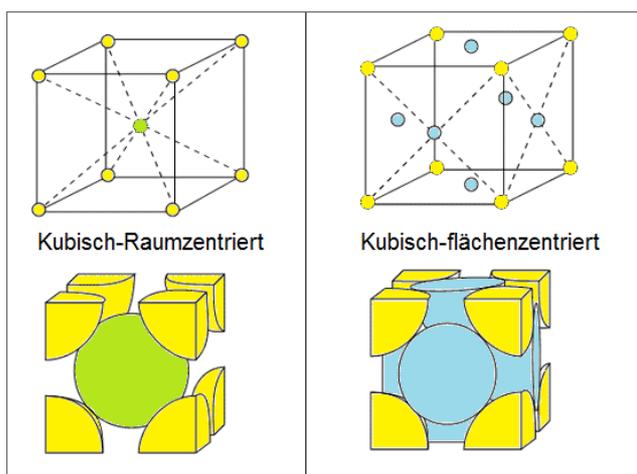
Bereits ein kleiner Kohlenstoffgehalt von 0,1% bewirkt eine Steigerung der Zugfestigkeit um ca. 100 MPa und steigert die Streckgrenze um 45 MPa. So ist die Vergütbarkeit des Stahls an seinen Mindestkohlenstoffgehalt gebunden. In weiterer Folge werden Begriffe wie der des Austenit und des Zementit kurz erklärt.

Der Begriff des Mischkristalles wurde bereits erläutert, ausständig ist im Bezug auf Eisen-Kohlenstoff-Legierungen die Aufzählung der verschiedenen Mischkristallarten.

Eisen-Kohlenstoffgitter bieten für kleine Fremdatome, sowie jene des Kohlenstoffes, verschiedene Einlagerungsmöglichkeiten. Dabei ergeben sich verschiedene Löslichkeiten aus dem Verhältnis der Größe der verfügbaren Gitterlücken zu der Größe der darin Platz nehmenden Fremdatome. Man unterscheidet beim Eisen zwei Gitterstrukturen (Abb.12).

Die **kubisch-raumzentrierten** Gitterstrukturen so wie sie bei α -Eisen und δ -Eisen auftreten, ermöglichen kleineren Fremdatomen wie jene von Wasserstoff (H), Bor (B), Kohlenstoff (C), oder Stickstoff (N) sich in ihren Gitterlücken einzulagern.

Die **kubisch-flächenzentrierte** Kristallgitterstruktur, wie sie zeichnend für γ -Eisen sind, lassen nur die Einlagerung von kleinen Fremdatomen mit Durchmesser eines 0,414 fachen des Gitteratomdurchmessers zu. Kubisch-flächenzentrierte Strukturen können auf Grund der oktaederförmigen Lückenpositionen wesentlich mehr Kohlenstoff lösen. Bei Abkühlung von γ -Mischkristallen bildet sich Austenit aus.



Austenit ist für die technische Wärmebehandlung, wie dem Vergüten und Härten von großer Bedeutung. Benannt wurde diese Gefügestruktur nach ihrem englischen Entdecker W. C. Robert-Austen.

Abbildung 12: Gitterstrukturen von Eisen

Die Löslichkeit von Kohlenstoffatomen ist stark temperaturabhängig. Wenn nun durch Abkühlung die Löslichkeit

der Kohlenstoffatome einer Fe-C-Legierung unterschritten wird, bestehen zwei Möglichkeiten der Ausscheidung:

- 1) Die Ausscheidung von Kohlenstoff in seiner elementaren Form, dies geschieht als Graphitstruktur, sie wird auch als stabile Phase der beiden Ausscheidungsmöglichkeiten bezeichnet.

- 2) Oder die Ausscheidung als metastabile Phase der Verbindung zwischen Eisen und Kohlenstoff. Sie wird auch als Carbide bezeichnet.

Das wichtigste Eisencarbid ist Zementit (Fe_3C), welches genau genommen nur bei reinen Fe-C-Legierungen auftritt. In der Praxis treten, aber auf Grund von zahlreichen vorteilhaften Eigenschaften meist nur Fe-C-Legierungen mit zusätzlichen Fremdatomen auf. So gesehen dürfte man streng genommen nur in den wenigsten Fällen von Zementit, sondern viel häufiger von Carbiden im Allgemeinen sprechen. Zementit ist auf Grund seiner harten Verbindungsphase (ca. 1100HV 10) und seiner hohen Sprödigkeit technisch sehr interessant. Die Bezeichnung metastabil entstammt der Tatsache, dass die Phase bei hohen Temperaturen zerfällt. Dabei wird die Temperaturgrenze von einem höheren Kohlenstoffanteil gesenkt.

2.6 Gefügeumwandlung in der Schweißnaht

Durch die sehr große und konzentrierte, manchmal auch punktuelle Wärmeeinwirkung, der die Schweißstelle ausgesetzt ist, ändern sich die Werkstoffeigenschaften in erheblichem Maße. Verschärfend kommt nun die rasche Abkühlzeit hinzu. Die Schweißstelle wird sehr hoch erhitzt, schließlich muss eine Aufschmelzung erreicht werden. Dies geschieht nun in kürzester Zeit, um gleich anschließend ohne die punktuelle Energieeinwirkung sehr rasch wieder abzukühlen. Folgen dieser starken Temperaturschwankungen sind unvollständige Gefügeumwandlung und Grobkornbildung. Diese geht in solchen Fällen stets mit gefährlichen Eigenspannungen einher. Letztere können in weiterer Folge zu einem Verzug des Werkstückes führen. Bei einer sehr hohen Abkühlungsgeschwindigkeit bildet sich aus dem Austenit durch einen diffusionslosen Umklappvorgang Martensit, man spricht dabei von Abschrecken. Dabei ist eine Diffusion von sowohl Kohlenstoff als auch Eisenatomen nicht mehr möglich. Es bilden sich somit lokale Härtespitzen infolge des Martensits. Martensit geht stets einher mit hohen Gitterspannungen und einem spröden Werkstoffverhalten, welches gerade in der Schweißnaht zu vielfältigen Arten von Rissbildungen führen kann. Im Nachfolgenden soll nun auf die zuvor erwähnten Konsequenzen der Gefügeumwandlung während des Schweißvorganges eingegangen werden.

Vor dem Schweißen herrscht in der Umgebung der Schweißfuge ein mehr oder weniger homogenes Gefüge. Dies ändert sich nun durch das Schweißen. Man differenziert für die nähere Betrachtung der Gefügeänderung den Bereich der Schweißänderung vom restlichen Werkstück. Dieser Bereich erstreckt sich vom Mittelpunkt der Schweißnaht bis hin zum Grundwerkstoff.

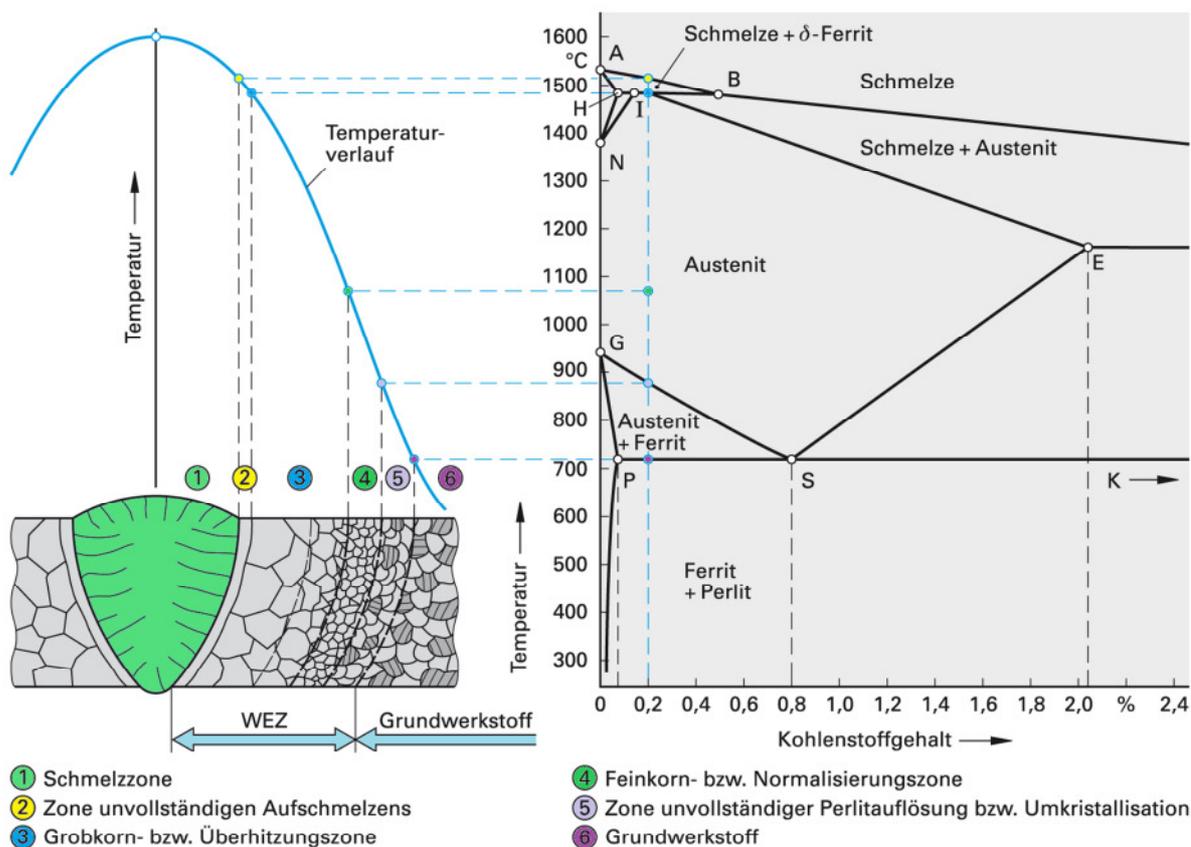


Abbildung 13: Gefügeänderung in Abhängigkeit des Temperaturverlaufes¹¹

Die Schweißnaht selbst besteht aus aufgeschmolzenem Grundwerkstoff mit eingebrachtem Zusatzwerkstoff (Schweißdraht). Zwischen der Schweißnaht und dem Grundwerkstoff entstehen verschiedene Bereiche mit unterschiedlichen Gefügestrukturen und somit auch diversen Werkstoffeigenschaften. Jenen Gesamtbereich nennt man in der Schweißtechnik Wärmeinflusszone (kurz: WEZ). Durch die hohe Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit setzt eine örtliche Wärmebehandlung ein. Die Ausbildung der WEZ ist immer abhängig vom verwendeten Schweißverfahren, dem Behandlungszustand und dem Werkstoff selbst. Abbildung 13 führt die WEZ eines unlegierten Stahls mit 0,2% Kohlenstoff beim Wolfram-Inert-Gasschweißen an. Das Schweißverfahren selbst hat einen starken Einfluss auf die Breite und Ausprägung der Wärmeinflusszone. Beispielsweise nehmen beim Einsatz von Schmelzschweißverfahren die Ausprägung der Wärmeinflusszone, also ihre drastischen Gefügeunterschiede stark zu. Die Breite der WEZ nimmt bei Verfahren mit geringerer Energiedichte, wie beispielsweise dem Gasschmelzschweißen, im Vergleich zu solchen mit hoher Dichte, wie dem Plasma, an Elektronenstrahl- und Laserstrahlschweißen zu.

¹¹ Läßle, *Werkstofftechnik Maschinenbau theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen; [neue europäische und internationale Normen]*, 105.

Es wird ersichtlich, dass bei der Verwendung vom Laserstrahlschweißverfahren bei authentischem Stahl eine schmale WEZ mit starkem Gefügegefälle und somit auch mit starken Eigenspannungen entsteht.

2.7 Mögliche Schäden und Fehler einer Schweißnaht

2.7.1 Rissbildung

Die Eigenspannungen können derart groß werden, dass sie nicht nur einen Verformungsbruch, sondern auch einen Spröbruch nach sich ziehen. Es sei dabei angemerkt, dass ein Verzug des Werkstückes stets ein Fertigungsproblem darstellt. Um dieses Problem zu verhindern, müssen viele einzelne Maßnahmen getroffen werden, von einer auf den Fertigungsprozess optimierten Konstruktion bis hin zur Nachbearbeitung des Werkstückes (Bsp. Spannungsarmglühen). Zu den gefährlichsten Problemen, die mitunter durch die hohe Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit beim Schweißen entstehen können, zählen Risse. Risse bilden sich auf Grund des starken Temperaturgefälles, welches über ein kurzes Zeitfenster stattfindet. Sie treten im Schweißgut und in der WEZ auf. Die Vermeidung der Rissbildung ist sehr schwer, da ihre Ursachen sehr vielfältig sind. Von der Sprödigkeit des Grundwerkstoffes, der Kompatibilität des Schweißzusatzes mit dem Grundwerkstoff bis hin zum Schweißverfahren. In Abbildung 14 seien die häufigsten Entstehungsorte für Risse angezeigt. Wie in dieser Abbildung ersichtlich, sind Risse nach ihrem Entstehungsort benannt. Man unterscheidet aber zwei grundsätzliche Arten von Rissentstehungen, in Abhängigkeit des Temperaturbereiches in dem sie entstehen: Heißrisse und Kaltrisse.

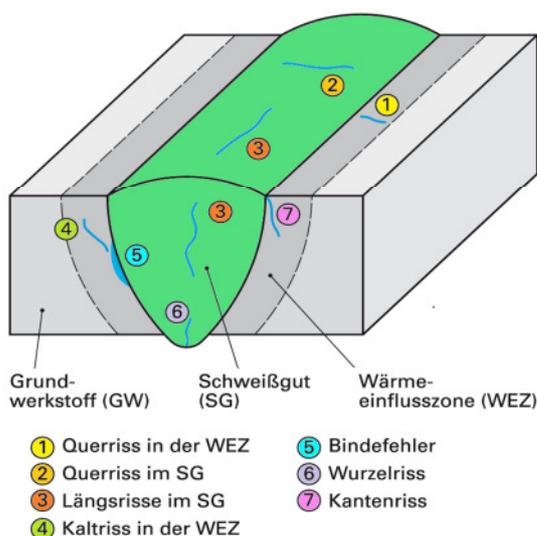


Abbildung 14: Entstehungsorte der Risse innerhalb der WEZ¹²

¹² Ebd.

Heißrisse

Sie entstehen im Temperaturbereich der Solidus- und Liquiduslinie. Zu dieser Gruppe zählen Erstarrungs- und Aufschmelzrisse, die verschiedene Entstehungsursachen besitzen.

Erstarrungsrisse

Sie entstehen während der Kristallisierung der Schmelze und bilden sich besonders stark aus bei Metallen mit einer kubisch-raum-zentrierten Gefügestruktur wie beispielsweise Eisen eines ist. Dabei entstehen in der Gitterstruktur schmale, lange Kristallstängel (in der Kristallographie Dendrite genannt), ihre Fronten schieben die Restschmelze vor sich her (Abb.15). Problematisch wird dies durch den Umstand, dass die Restschmelze meist reich an Schwefel und Phosphor ist. Diese beiden Zusätze besitzen eine geringere Erstarrungstemperatur und ein sprödes Verhalten. Aus dem ersten Umstand ergibt sich, dass am Ende der Erstarrung zwischen den Dendriten noch flüssige Restschmelze eingeschlossen sein kann. Sie ist während ihres Erstarrungsvorganges nicht in der Lage Schrumpfspannungen aufzunehmen und hinterlässt so Risse zwischen den Dendritenfronten und -flanken (Abb. 15). Erstarrungsrisse muss speziell bei Legierungen mit hohem Schwefel-und/oder Phosphoranteil Beachtung geschenkt werden. Dies gilt auch für Werkstoffe mit einem großen Erstarrungsintervall bei denen die Temperaturdifferenz mehr als 100 Kelvin beträgt. Gleichsam sei bei Werkstoffen mit geringer Zähigkeit Vorsicht geboten.

Diese Aufzählung verdeutlicht, dass bei den meisten Stählen und Cu-ZN-Legierungen stets mit Erstarrungsrisse zu rechnen ist.

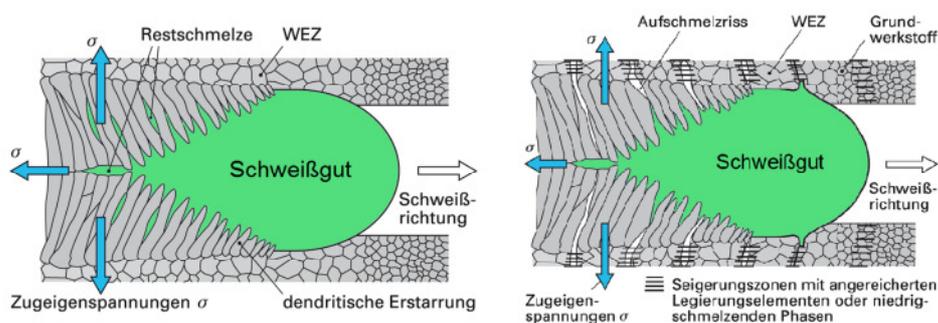


Abbildung 15: Entstehung von Erstarrungsrisen (links) und von Aufschmelzrisen (rechts)¹³

Aufschmelzrisse

Sie entstehen am Rand des Schweißgutes (Abb.15). Sie entstehen im festen Zustand, ihre Entstehungsursachen selbst können sehr verschieden sein. Was Sie im Gegensatz zu den Heißrisen aber gemein haben ist, dass sie bei einer schweißgerechten Konstruktion und ihrer fachgerechten Ausführung vermeidbar sind.

¹³ Dillthey, *Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen*, 2005, 106.

Besonders heißrissgefährdet sind, auf Grund ihres geringen Lösungsvermögens austenitische Stähle. Zu dieser Klasse gehört auch der im Forschungsprojekt verwendete Stahl.

Kaltrisse

Sie bilden sich, im Solidusbereich, also im festen und abgekühlten Zustand des Bauteils aus. Ihre Entstehungsursachen sind so vielfältig und verschieden wie ihre Untergruppen selbst. Gemein haben sie aber alle, dass zu ihrer Vermeidung sowohl eine Optimierung der Konstruktion als auch eine fachgerechte Ausführung der Schweißung ausreicht.

Aufhärtungsrisse

Sie entstehen auf ähnliche Weise, wie die Stahlhärtung, über Martensitbildung. Durch das Aufheizen austenitisiert der angrenzende Bereich der WEZ an die Schmelzlinie. Die rasche Abkühlung trägt nun dazu bei, dass mehr oder minder ausgedehnte Martensitbereiche entstehen. Martensit besitzt eine hohe Härte und somit Festigkeit besitzt, daher hat es keine plastische Verformungsfestigkeit und kann die Schweißeigenspannung nicht aufnehmen. Es kommt zu einem transkristallinen Riss durch die WEZ.

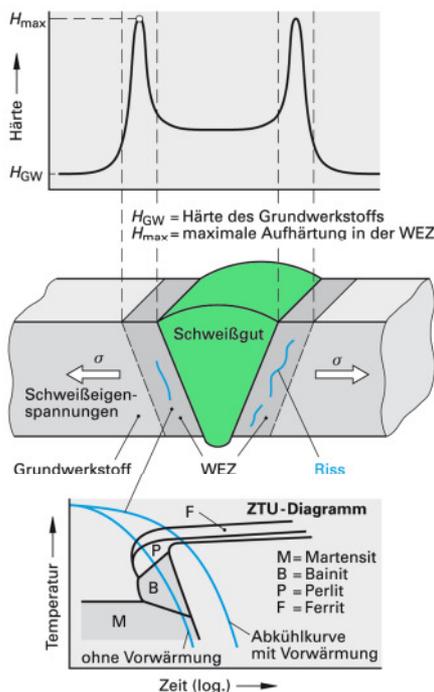


Abbildung 16: Entstehung von Aufhärtungsrisen¹⁴

Für die Martensitbildung und somit der eigentlichen Ursache der Aufhärtungsrisse ist der Kohlenstoffgehalt des Stahles wesentlich. C-Gehalte unter 0,22 % weisen nur unwesentliche Aufhärtungen und somit eine geringe Aufhärtungsrissegefahr auf. Mit

¹⁴ Läßle, *Werkstofftechnik Maschinenbau theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen*; [neue europäische und internationale Normen], 107.

steigendem C-Gehalt steigt auch die Diffusionsbehinderung der Kohlenstoffatome und somit die Martensitbildung.

Dearden und O'Neil entwickelten Mitte der 40er Jahre das Kohlenstoffäquivalent (CEV). Es ermöglicht niedriglegierten Stählen die Gefahr der Aufhärtungsrisbildung in Abhängigkeit ihrer chemischen Zusammensetzung zu ermitteln. Dabei wird die Wirkung eines Legierungselements auf die Risbildung in eine dementsprechende Kohlenstoffmenge umgerechnet und somit bewertet. Das internationale Schweißinstitut (IIW) wendet folgende Beziehung (siehe DIN EN 10025-1) für $t_{8/5}$ -Abkühlzeiten (dh. Abkühlzeiten zwischen 800°C und 500°C) von mehr als 10 Sekunden an:

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Bei einem Kohlenstoffäquivalent von unter 0,40 % kann ohne Gefahr einer Entstehung von Aufhärtungsrisen geschweißt werden. Bei einem höheren Wert muss so wie in dem Praxisbeispiel vorgewärmt werden. Die beiden Hälften des Laufrades aus X3CrNiMo13-4 werden beispielsweise auf 100°C vorgewärmt. Wie später veranschaulicht wird, ist dies keine besonders hohe Vorwärmtemperatur. Das Vorwärmen senkt das Temperaturgefälle zwischen Schweißgut und Grundwerkstoff, der Anteil an Martensitbildung sinkt. Ein weiterer Vorteil ist die Senkung von Eigenspannungen. Die Vorwärmtemperatur hängt von der Materialstärke, der Nahtart und der eingebrachten Wärmeenergie (auch Streckenenergie genannt) des verwendeten Verfahrens ab.

Tabelle 3: Vorwärmtemperatur in Abhängigkeit des Kohlenstoffgehaltes¹⁵

Kohlenstoffäquivalent %	Vorwärmtemperatur °C
< 0,40	keine Vorwärmung
0,40 ... 0,50	100 ... 200
0,50 ... 0,55	200 ... 300
0,55 ... 0,60	300 ... 400

Die Rissneigung wird in der Praxis gerne über die Maximalhärte in der WEZ abgeschätzt. Diese Anwendung kommt häufig bei un- und niedriglegierten Stahl (geringer Kohlenstoffäquivalenzanteil) zu tragen. Es versteht sich, dass durch die Zunahme der Härte und somit der Abnahme der Verformungsfestigkeit die Neigung zur Bildung von Aufhärtungsrisen stark steigt.

¹⁵ Ebd., 106.

Tabelle 4: Wahrscheinlichkeit der Bildung von Aufhärtungsrisen in Abhängigkeit von Höchst Härte und Martensitgehalt¹⁶

Höchst Härte in der WEZ HV 10	Martensit- gehalt %	Neigung zur Bildung von Aufhärtungsrisen
< 280	< 30	unwahrscheinlich ¹⁾
280 ... 350	30 ... 50	unwahrscheinlich
350 ... 450	50 ... 70	möglich
> 450	> 70	wahrscheinlich

1) ausreichende Betriebssicherheit auch ohne Wärmenachbehandlung

Wasserstoffinduzierte Risse

Wasserstoff gelangt häufig in das Schweißgut bzw. WEZ über feuchte Schweißpulver oder feuchte Schweißgase, aber auch die Luftfeuchtigkeit kann eine Ursache sein. Die Notwendigkeit einer Schutzatmosphäre wird wieder unterstrichen. In Kapitel 6 ist zu sehen, dass in der manuellen Fertigung des Forschungsprojektes spezielle Maßnahmen zur Vermeidung von wasserstoffinduzierten Rissen getroffen und festgelegt worden sind.

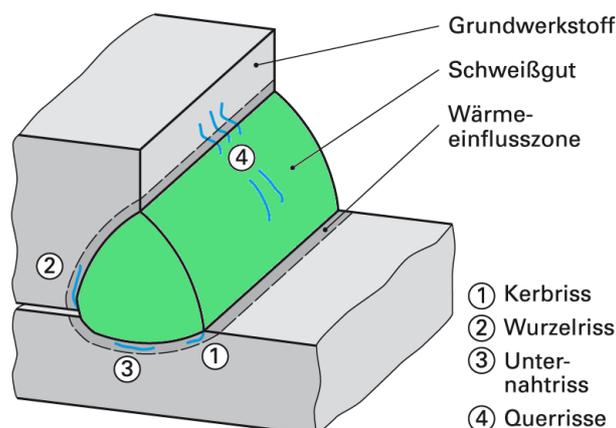


Abbildung 17: Wasserstoffinduzierte Kaltrisse¹⁷

Die Arten der wasserstoffinduzierten Risse werden nach ihren Entstehungsorten in der Schweißnaht benannt. Wasserstoff gelangt aber auch durch Rost, Farbe oder Fette in das Schweißgut. Eine Vorbereitung der Schweißnaht, welche eine gründliche Reinigung der Schweißfuge vorsieht, zählt bereits als eine Verhinderungsmaßnahme gegen wasserstoffinduzierte Risse. Nebenbei sei angemerkt, dass diese Maßnahme auch Poren und Einschlüsse vermeidet. Wenn nun Wasserstoff oder eine obengenannte wasserstoffreiche Verunreinigung in den Einwirkungsbereich des Lichtbogens gelangt, so erfolgt die Aufspaltung und damit die Freisetzung von ionisierten Wasserstoffatomen, welche in das Schweißbad eintreten. Tritt anschließend die schweißtypische zügige Erstarrung ein, so haben die Wasserstoffatome keine Möglichkeit mehr zu entweichen. Die dadurch entstehende

gründliche Reinigung der Schweißfuge vorsieht, zählt bereits als eine Verhinderungsmaßnahme gegen wasserstoffinduzierte Risse. Nebenbei sei angemerkt, dass diese Maßnahme auch Poren und Einschlüsse vermeidet. Wenn nun Wasserstoff oder eine obengenannte wasserstoffreiche Verunreinigung in den Einwirkungsbereich des Lichtbogens gelangt, so erfolgt die Aufspaltung und damit die Freisetzung von ionisierten Wasserstoffatomen, welche in das Schweißbad eintreten. Tritt anschließend die schweißtypische zügige Erstarrung ein, so haben die Wasserstoffatome keine Möglichkeit mehr zu entweichen. Die dadurch entstehende

¹⁶ Hans J Fahrenwaldt und Volkmar Schuler, *Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung* (Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006), 107, <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9192-1>.

¹⁷ Läßle, *Werkstofftechnik Maschinenbau theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen; [neue europäische und internationale Normen]*, 108.

Schädigung des Werkstückes wird in Fachkreisen mit verschiedenen Theorien erklärt. Die älteste und bereits durch Experimente widerlegte Theorie besagt, dass eingeschlossener Wasserstoff an inneren Fehlstellen im Gitter rekombiniert und so hohe Drücke erzeugt werden, die zu einer Werkstofftrennung führen. Eine andere und weit mehr unterstützte Theorie, welche auch experimentell fundiert ist besagt, dass Wasserstoff elastische und plastisch verformte Gitterbereiche von Fehlstellen anreichert. Dabei wird die Bindungsenergie zwischen den Metallatomen vermindert, wodurch ein durch Sprödigkeit begünstigter Rissfortschritt ermöglicht wird. Solche Fehlerstellen wären beispielsweise Risse, Mikroporen oder Einschlüsse. Wenn nun im Mittelpunkt eines durch Wasserstoff versprödeten Bereichs zufällig eine Pore oder ein Einschluss existiert, so bildet sich um diese Fehlstelle eine kreisrunde Fläche um die das Material einbricht. Diese Brüche werden in der Schweißtechnik als Fischauge bezeichnet.

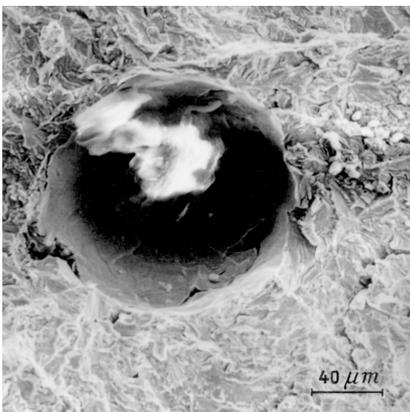


Abbildung 18: mikroskopische Sicht auf ein Fischauge in einer Schweißnaht¹⁸

Da die Risse eine Diffusion des Wasserstoffes voraussetzen treten diese Arten von Kaltrissen nicht direkt nach dem Schweißen, sondern vielmehr mit einer zeitlichen Verzögerung von mehreren Tagen auf. Diese verzögerte Rissbildung ist besonders für Serien- und Massenproduktionen sehr gefährlich, da das Werkstück zum Eintritt der Rissbildung meist schon die letzte Instanz der Qualitätsprüfung, den „BUY OFF“ durchlaufen hat. Vermieden werden solche Risse durch Trocknung der Elektrode, des Schweißpulvers sowie durch Entfernung von Rost-, Fett- und Lackresten. Spannungsarmglühen im Anschluss an das Schweißen vermindert die Gefahr von Eigenspannung und so wie die Diffusion von Wasserstoff in die Fehlstellen. In der Praxis macht man auch Gebrauch von einem sogenannten „Soaking“, zu Deutsch Wasserstoffglühen. Dabei wird das Werkstück mehrere Stunden bei 250 °C einer Wärmenachbehandlung unterzogen. Wiederholt sei an dieser Stelle auch die Notwendigkeit einer fachgerechten Vorbereitung, welche sowohl die Reinigung als auch das Vorwärmen des Werkstückes umfasst.

¹⁸ Erhard Hornbogen und Birgit Skrotzki, *Mikro- und Nanoskopie der Werkstoffe*, Auflage: 3. Aufl. 2009 (Berlin; Heidelberg: Springer, 2009), 349.

Terassenbrüche

Sie werden auch Lamellenrisse genannt (Abb.19). Ihr Auslöser liegt in der Zugbeanspruchung der Schweißnaht. Ihre Ursachen sind Einschlüsse, die flächenförmig, lange Fehlstellen bilden, beispielsweise Mangansulfide (MnS). Solche Fehlstellen führen zu einem Zähfähigkeitsverlust und als weitere Folge einer Zugbeanspruchung zu einem Lamellenriss. Gehäuft tritt diese Art von Kälterissen bei Wälz- oder Schmiedeerzeugnissen auf, wenn diese senkrecht zur Faserrichtung beansprucht werden. Die Senkung des Gehalts von Schwefel trägt dabei wesentlich zur Prävention von Terrassenbrüchen bei. Eine andere wirkungsvolle Maßnahme ist die Vorbeugung durch konstruktive Adaption, wie sie in der Abbildung ersichtlich ist.

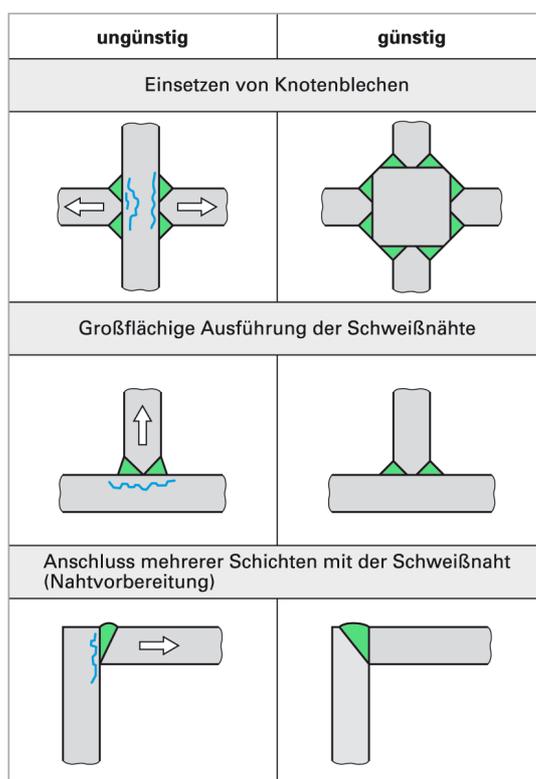


Abbildung 19: Konstruktive Maßnahmen zur Vermeidung von Terrassenbrüchen¹⁹

Ausscheidungsrisse

Ihre Entstehungsursache liegt in der Präventionsmaßnahme von anderen Rissen, dem Spannungsarmglühen. Es werden dabei während des Schweißens oder während der Nachbehandlung (Spannungsarmglühen), spröde Phasen in der Schmelzlinie ausgeschieden, diese tragen zur Rissbildung bei. Besonders betroffen sind Stähle mit Carbiden, die leicht löslich sind, wie beispielsweise TiC, NbC, VC. Diese Carbide lösen sich während des Schweißens auf. Während des Abkühlungsvorganges werden sie nur teilweise ausgeschieden, wodurch sich ein

¹⁹ Läßle, *Werkstofftechnik Maschinenbau theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen; [neue europäische und internationale Normen]*, 109.

übersättigter Mischkristall bildet. Durch das nachfolgende Spannungsarmglühen werden diese Mischkristalle völlig ausgeschieden und führen zu einer Verfestigung des Kornes. Es entstehen entlang der Korngrenzen ausscheidungsfreie Zonen, dadurch wird der Formänderungswiderstand dieser Zonen erheblich niedriger in Relation zum Korn selbst. So kommt es schlussendlich zu einer Begünstigung der Rissbildungen im Korngrenzenbereich.

Hohlräume

Zu dieser Gruppe zählen Gasblasen und Lunker. Sie entstehen durch den Umstand, dass flüssige Metalle Gase lösen, welche im Zuge der Erstarrung wieder ausgeschieden werden müssen. Hohlräume bilden sich an der Erstarrungsfront, zwischen flüssigem und festem Material. Tritt nun die Erstarrung über einen längeren Zeitraum ein, sodass die Erstarrungsfront langsam vorschreitet und die Gasblasen vor sich herschiebt, können diese aufsteigen und entweichen. Es bilden sich also Einschlüsse, wenn die Bildung der Gasblasen langsamer erfolgt als Kristallisation. In der Abbildung „Einschlüsse, Poren und Risse“ sind die verschiedenen Formen von Hohlräumen veranschaulicht: Kugelförmige Gaseinschlüsse, Schlauchporen, Porenketten und Porennesten. Letztere treten meist in Kombination mit Verunreinigung auf. Als Vorbeugung dient ein langsames Erstarren, welcher durch eine geringe Schweißgeschwindigkeit bei hoher Wärmeeinbringung erreicht wird. Selbstverständlich ist die Abschirmung vor Gasen, Feuchtigkeit und Verunreinigungen durch die Schutzatmosphäre noch immer wesentlich für eine vollständige Prävention.

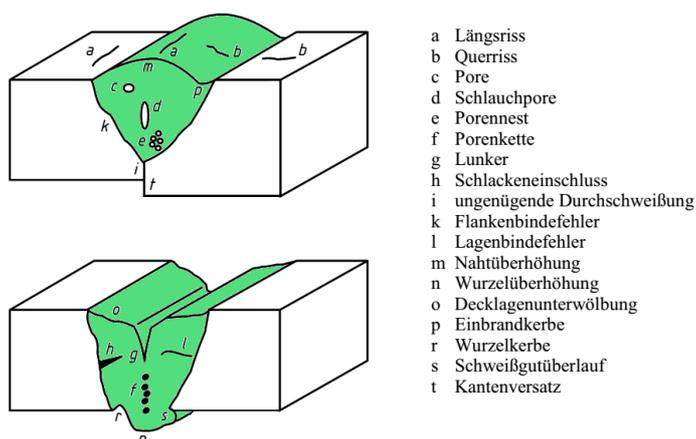


Abbildung 20: Einschlüsse, Poren und Risse²⁰

Lunker

Sie gehören zur Klasse der Hohlräume, die durch eine bei Abkühlung vollzogenen Volumsänderung verursacht werden. Ihr Auftreten häuft sich in Bereichen, in denen

²⁰ Fahrenwaldt und Schuler, *Praxiswissen Schweißtechnik*, 515.

während des Erstarrungsvorganges keine weitere Schmelze nachgespeist werden kann, also am Ende der Schweißnaht. Ihr Erscheinungsbild ähnelt einem Krater, daher spricht man auch von Endkratern. Sie verursachen eine Schwächung des Querschnittes und stellen auch eine Kerbe und somit eine spannungskritische Stelle dar. Verhindert werden Lunker, indem man beim Lichtbogenschweißen, die Elektrode vom Ende der Naht nochmals ein Stück auf die bereits geschweißte Naht zurückführt, und dann ein Stück weit weg vom Ende, den Lichtbogen zum Erlöschen bringt. Beim Wolfram-Inert-Gasschweißen und dem Metall-Aktivgas-Schweißen gibt es besondere Stromprogramme, die ein Auftreten solcher Endkrater durch langsames Absenken des Schweißstromes automatisch herbeibringen.

Feste Einschlüsse

Neben den Einschlüssen durch Gasblasen gibt es noch jene, die von Feststoffen herrühren. Es handelt sich dabei vorwiegend um nichtmetallische Einschlüsse, welche diverse Formen wie zum Beispiel kugelig-, schicht oder nadelförmig annehmen können. Sie bestehen aus Oxiden und Sulfiden. Häufig trifft diese Art der Einschlüsse bei Mehrlagenschweißung auf, wenn die Schlacke nicht sorgfältig entfernt wird. Sie tritt aber auch an verschmutzten Schweißkanten auf. Abhilfe schafft eine sorgfältige und gründliche Reinigung.

3 Wolfram-Inert-Gasschweißen

3.1 Einleitung

Das Wolfram-Inert-Gasschweißen (kurz WIG) zählt ebenso wie das Metall-Schutzgasschweißen, dessen gebräuchlichste Vertreter das MIG- und MAG-Schweißen sind, zur Gruppe des Schutzgasschweißens. Dabei wird das Schmelzbad durch die Wärmeenergie eines Lichtbogens erzeugt. Von einem Lichtbogen spricht man, wenn zwischen zwei Elektroden eine sich selbsterhaltende Gasentladung stattfindet. Dabei muss die Spannung, also die elektrische Potentialdifferenz zwischen den beiden Elektroden groß genug sein um eine Zündung durch Stoßionisation zu erreichen. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass eine Gasentladung bedeutet, dass durch eine ausreichende hohe Spannung Gasmoleküle durch Ionisation in der Lage sind, elektrischen Strom zu leiten.

Der Name dieser Schweißgruppe rührt aus dem Umstand, dass die Elektrode, der Lichtbogen und das Schweißbad durch ein zugeführtes aktives oder inertes (lat.: träge) Gas, welches Schutzgas genannt wird, abgeschirmt wird.

Wie bereits erwähnt unterscheidet man zwei große Gruppen des Schutzgasschweißens, das Wolfram-Inert-Gasschweißen und das Metall-Schutzgasschweißen. Diese beiden Gruppen werden weiter anhand der Art ihrer Lichtbogen und der verwendeten Schutzgase unterteilt (Abb.21).

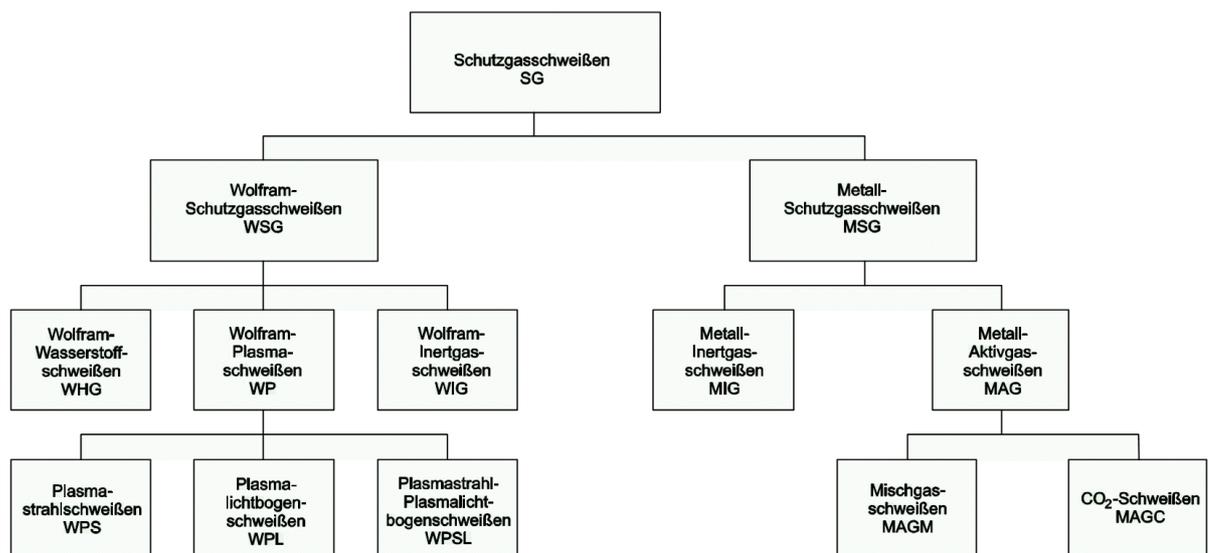


Abbildung 21: Schutzgasschweißen²¹

²¹ Ebd., 60.

3.2 Verfahrensprinzip des WIG-Schweißens

Das spezielle am WIG-Schweißen ist, dass der Lichtbogen zwischen einer nicht abschmelzenden Wolframelektrode (gängige Durchmesser 1,5-6mm) und dem Werkstück brennt. Wie oben dargestellt, brennt der Lichtbogen zwischen Werkstück und Wolframelektrode, um welche konzentrisch eine Düse angeordnet ist. Durch diese Düse strömt das Schutzgas. Abb.22 zeigt einen WIG-Schweißkopf mit einer zentrisch ummantelnden Schutzgaszufuhr.

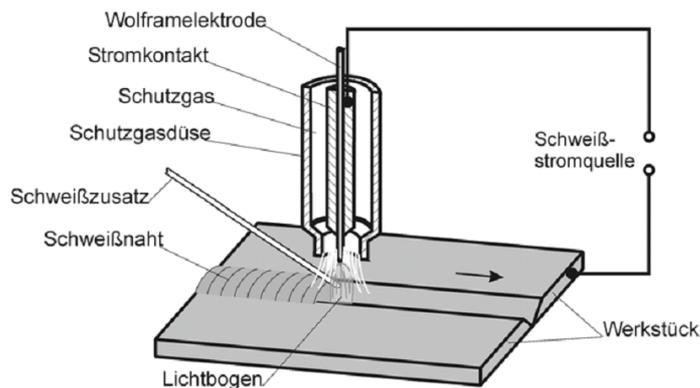


Abbildung 22: Schema WIG²²

Wenn Werkstoff (Schweißzusatz oder Zusatzwerkstoff genannt) zugeführt werden muss, geschieht dies entweder von Hand mit Schweißstäben oder mechanisch über Förderrollensysteme, auf welche noch später näher eingegangen wird. Der Zusatzwerkstoff kann entweder stromlos oder durch eine zweite Stromquelle widerstandserwärmt (WIG-Heißdrahtverfahren) zugeführt werden. Der Vorteil einer eigenen Stromquelle liegt darin, dass der Lichtbogen somit ausschließlich für das Aufschmelzen des Grundwerkstoffes genutzt wird, welches eine Steigerung der Schweißgeschwindigkeit ermöglicht.

Der Einsatz einer reinen Wolframelektrode wäre beim WIG-Schweißen durchaus möglich. Bevorzugt werden aber Legierungen die sowohl Vorteile in der Strombelastbarkeit und der Elektronenemission und der damit einhergehenden verbesserten Lichtbogenstabilität bieten. Durch Anspitzen der Elektrode und Legierung mit Seltenerdoxid wie beispielsweise La_2O_3 , CeO_2 , Y_2O_3 wird eine Steigerung der Lichtbogenstabilität und eine Erleichterung der Lichtbogenzündung erreicht. Die Bezeichnung „Seltenerdoxid“ ist etwas irreführend und sei an dieser Stelle genauer erklärt. Oxide sind Sauerstoff-Verbindungen, die entstehen, wenn brennbare Stoffe mit Sauerstoff reagieren. Speziell bei Metallen spricht man dabei

²² Ulrich Dilthey, *Schweisstechnische Fertigungsverfahren. 1, 1*, (Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006), 55, <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-33154-9>.

von Metalloxiden. Durch den Elektrodenunterschied zwischen den stark elektronegativen Metallen kommt es zu einer meist ionischen oder wenigstens zu einer polaren Bindung. Seltenerdoxide sind also ein Produkt der chemischen Reaktion zwischen Sauerstoff und Metallen der Gruppe „seltene Erden-Metalle“. Ihren Namen haben diese Metalle aus der Zeit ihrer Entdeckung, als ihre Auffindung nur selten und dann auch nur als Mineraloxide möglich war. Im Periodensystem findet man sie in der 3. Nebengruppe. Der Grund ihres häufigen Einsatzes bei vielen Schweißelektroden (nicht nur WIG) liegt in ihrer ionisierten Eigenschaft. Die Elektrodenwerkstoffe sind in der DIN EN 26 848 genormt und genauer erklärt.

Die Form der Elektrodenspitze richtet sich nach der Stromart, den Zündungs- und Schweißereigenschaften als auch der Schweißnahtgeometrie. Sie alle werden stark von der Form und Rauigkeit der Elektrodenspitze beeinflusst. Für Gleichstrombetrieb wird eine Elektrode mit einer Kegelspitze im Verhältnis 1:3 verwendet. Für den Fall, dass mit Wechselstrom geschweißt wird, werden kegelstumpfförmig bis zylindrische Elektrodenenden gebraucht. Zur Schonung der Elektrode sollte die Zündung des Lichtbogens ohne Kontakt erfolgen. Dies wird unter Einsatz von Zündhilfen wie Hochfrequenzimpulse erreicht. Eine Zündung wird durch hochfrequente Hochspannungsimpulse aus einem Hochfrequenzgenerator erzeugt. Der dabei entstehende Funke ionisiert das Schutzgas und bildet die Voraussetzung für eine nachfolgende Zündung. Dies geschieht auf Grund der großen Spannung (mehrere 1000 Volt) zwischen Elektrode und Grundwerkstoff. Eine Kupferdüse dient als Schutz gegen eine Elektrodenüberhitzung. Notwendig wird eine Keramikdüse und die Kühlung durch das Schutzgas bei Stromstärken von 110 A bis 150 A.

Sehr gut als Schutzgas geeignet wäre Helium, da es zur Gruppe der Edelgase zählt und aus diesem Grund nur unter extremen Bedingungen chemische Reaktionen eingeht. Tatsächlich ist aber ein anderer Vertreter der Edelgase in der Praxis gebräuchlich, und zwar Argon. Grund ist die Kostenreduktion, da das Edelgas Argon wesentlich wirtschaftlicher ist als Helium. Aufgrund der hohen Anforderungen an das Schutzgas muss Argon eine Reinheit von 99,5% aufweisen, damit eine Oxidation der Wolframelektrode vermieden werden kann. Übliche Gebindemaße sind 50 Liter-Stahlflaschen mit 10 m³ Inhalt bei einem Überdruck von 200 bar. Die Regulierung des Schutzgasstromes ist eine wichtige Prozessgröße der Schweißnahtherstellung. Der Strom darf nicht zu groß sein, da verursachte Turbulenzen zu einem Eindringen von Luft führen würden und somit zur Oxidation des Schweißbades. Gleichzeitig darf eine bestimmte Menge auch nicht unterschritten werden, da sonst die Schutzatmosphäre nicht aufrecht erhalten werden kann und der Schweißbereich ungeschützt wäre. Daher ist zur Regelung neben einem Druckmindererventil auch ein Gasdruckflussmesser erforderlich. Ein Druckminderer reduziert den Gasdruck von dem Flaschendruck auf den gewünschten Arbeitsdruck (DIN 8546). Im Falle eines geringen Flaschendruckes und geringen Druckschwankungen ist ein

einstufiger Druckminderer ausreichend. Bei hohem Flaschendruck wird in der Regel von einem 2-stufigen Druckminderer Gebrauch gemacht.

Das System eines Druckminderers wird nun an Hand eines einstufigen Exemplars kurz schematisch erklärt. Ein Ventilteller wird von zwei Federn belastet. Eine davon ist bestrebt, das Ventil zu schließen (Schließfeder). Die zweite Feder nennt man „Einstellfeder“. Sie wird mit der Einstellschraube verändert und stellt somit den gewünschten Arbeitsdruck, mit dem die Membran beaufschlagt wird, ein. Bei eingestelltem Arbeitsdruck ergibt sich ein Gleichgewicht zwischen den Federkräften. Sollte der Arbeitsdruck zu hoch werden drückt dieser die Membran entgegen der Wirkrichtung der Einstellfeder nach unten, und schließt somit das Ventil. Vice versa, drückt die Einstellfeder bei Unterschreitung des Arbeitsdruckes der Membran nach oben und erhöht somit den Durchflussstrom.

Eine Vielzahl von Metallen wie beispielsweise Stahl, Aluminium, Kupfer, Nickel, Titan und deren Legierungen können mit dem WIG-Verfahren verschweißt werden. Ein großer Nachteil dieses Verfahrens ist aber seine schwache Abschmelzleistung. Bis zu 4 mm starke Bleche können durch dieses Verfahren leistungsfähig geschweißt werden. Diese Blechstärke lässt sich aber durch die Anwendung des zuvor erwähnten WIG-Heißdrahtschweißens oder einer Kombination aus WIG und Plasmaschweißen (darauf wird später detailliert eingegangen) erhöhen. Auf Grund dieses Umstandes wird dieses Verfahren mit großem Erfolg zum Durchschweißen von einseitigen Wurzellagen verwendet. Wobei die Wurzel meist mit dem WIG-Verfahren verschweißt wird, welches bei geringen Fugenweiten wirtschaftlich ist und die oberen Lagen (auch „Füll- und Decklagen“ genannt) werden mit anderen leistungstärkeren Verfahren verschweißt. Zu seinem späteren Zeitpunkt wird gezeigt, dass auch im Forschungsprojekt von einem Wechsel zwischen dem WIG und dem MAG-Verfahren Gebrauch gemacht wird.

3.2.1 Stromart und Polung

Ein wesentlicher Unterscheidungspunkt bei den verschiedenen WIG-Schweißverfahren ist die Polung und die Stromart. Die größte Bandbreite an Metallen wird, wie es häufig in der Industrie der Fall ist, mit einer minusgepolten Elektrode und mit Gleichstrom geschweißt. Eine Alternative dazu wäre die Pluspolung der Elektrode bei Beibehaltung des Gleichstromes. Vorteil dieser Variante ist der erzielbare Reinigungseffekt, der durch das Aufprallen der positiven Ionen aus der Schutzgasatmosphäre auf die negativ gepolte Werkstückoberfläche erreicht wird. Durch die bei dem Aufprall entstehende Wucht wird die Oxidhaut zerstört und man spricht von einem Reinigungseffekt. Der Nachteil dieser Polungsart ist aber, dass die Elektrode durch den konzentrierten Lichtbogenbrennpunkt stark thermisch belastet wird, wodurch eine Kühlung der Elektrode notwendig werden kann. Bei Aluminium-

und Magnesiumlegierungen wird daher statt Gleichstrom Wechselstrom eingesetzt. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass bei der negativen Stromphase an der Elektrode eine Entlastung eintritt. Der Reinigungseffekt wird bei dem Betrieb mit einer Wechselstromquelle aber durch den Gleichrichtereffekt gemindert. Grund für diese Erscheinung ist die Abhängigkeit des Stromflusses und der Elektronenemission begünstigt durch die Temperatur der Kathode. Es ergibt sich am Werkstück in der Regel eine niedrigere Schmelztemperatur (z.B. Aluminium 660°C) als an der Elektrode (Wolfram), wodurch es zu einer Emissionsdifferenz und daher zu einem kleinerem Strom in der abkühlenden Minusphase kommt. Im Strom-Zeit-Diagramm ist dieser Effekt durch eine Verschiebung nach oben, wie sie durch eine Überlagerung bei Gleichstrom eintritt, ersichtlich, daher wird dieser auch Gleichrichtereffekt genannt (Abb. 23). Von Vorteil ist ein rechteckiger Wechselstrom, da dieser eine Veränderung des Verhältnisses zwischen Plus- und Minuswellen (Balance) zulässt. Überdies kann auch mit verschiedenen Frequenzen bei dieser Ausführung gearbeitet werden. Das Zündverhalten ist von der Polung und der Wahl des Schutzgases beeinflusst wird. So zeigt beispielsweise reines Argon bei einer positiv gepolten Elektrode besonders gute Ergebnisse.

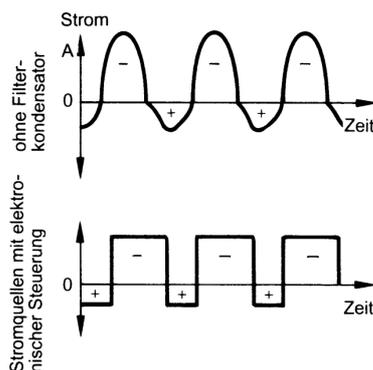


Abbildung 23: Verbildlichung des Gleichrichtereffektes bei WIG-Wechselstrom (Polung der Elektrode eingetragen)

Der grundsätzliche Nachteil bei der Wechselstromvariante ist, dass der Lichtbogen beim Durchfahren des Nulldurchganges der Spannung erlischt. Problematisch ist dies, weil das Schutzgas keine Lichtbogenstabilisatoren wie leicht ionisierbare Metallverbindungen aufweist, wie zum Beispiel in Verfahren bei denen die Elektrode abschmilzt oder Schweißpulver eingesetzt wird (Unterpulverschweißen). Deswegen ist eine selbstständige Neuzündung des Lichtbogens nicht sichergestellt. Als Abhilfe dient eine kurzzeitige Spannungsspitze unmittelbar nach dem Nulldurchgang, oder eine hochfrequente Hochspannung von ca. 3000 V die während der gesamten Schweißzeit beibehalten wird (Abb.24).

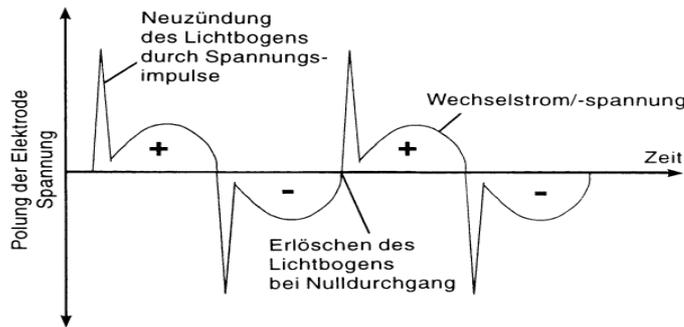


Abbildung 24: Hochspannungsimpulse zur Neuzündung²³

Eine neue elektronische Stromquelle namens „Square-Wave“ mit einem senkrechten Übergang von der positiven zur negativen Polung gewährleistet, dass die Lichtbogenstrecke während des Nulldurchganges des Stromes ionisiert bleibt und der Lichtbogen nicht erlischt. Bei diese Verfahrensart ist für die Erstzündung noch immer eine einmalige Hochfrequenzspannung notwendig.

3.2.2 WIG-Plasmaschweißen

Von Plasma spricht man, wenn Gas unter Zufuhr von hoher elektrischer Wärme- oder Strahlungsenergie zu einem elektrisch leitenden Medium wird. Dabei werden aus den Gasatomen Elektronen herausgelöst und in Richtung Anode beschleunigt. Ihr Aufprall setzt kinetisch Energie am Werkstück frei, welche in thermische Energie umgewandelt wird und so Grund- und Zusatzwerkstoff aufschmilzt.

Beim Lichtbogenschweißverfahren brennt der Lichtbogen frei, was beim Plasmaschweißen nicht der Fall ist. Hier wird der Lichtbogen durch eine wassergekühlte Kupferdüse gebündelt, woraus sich auch eine starke Verringerung des Lichtbogenquerschnittes ergibt. Diese Bündelung ermöglicht eine zylindrische Lichtbogenentladung mit einer höheren Leistungsdichte.

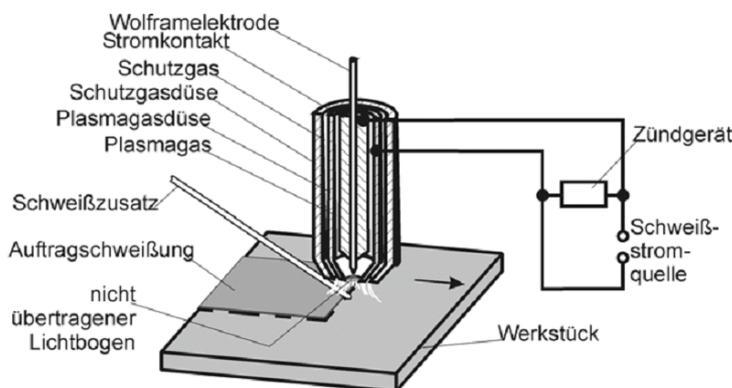


Abbildung 25: Schema des WIG-Plasmaschweißens²⁴

²³ Ebd.

Man unterscheidet beim Plasma-schweißen zwei Schaltungsarten, das Plasmastrahlschweißen (WPS) und das Plasmalichtbogenschweißen (WPL). Bei dem Plasmastrahlschweißen zündet der Lichtbogen im Düseninneren den Plasmastrahl, welcher durch die Düsenöffnung nach außen tritt und keinen Strom führt und daher auch leistungsschwächer ist.²⁵ Beim Plasmalichtbogenschweißen wird der Lichtbogen zwischen Elektrode und Werkstück gezündet, die Düse schnürt diesen Strahl ein. Der übertragende Lichtbogen ermöglicht eine zusätzliche Erwärmung des Schmelzbades und gibt durch die zusätzliche kinetische Energie einen Mehrwert an Leistung ab. (Abb.26)

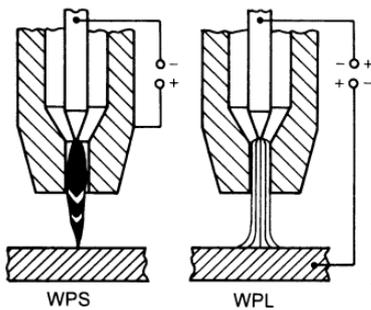


Abbildung 26: Plasmastrahlschweißen WPS und Plasmalichtbogenschweißen WPL²⁶

²⁴ Ebd., 62.

²⁵ Karl-Heinrich Grote u. a., *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*, 2011.

²⁶ Diltney, *Schweisstechnische Fertigungsverfahren*. 1, 1., 67.

4 Metall-Aktivgas-Schweißen

Das Metall-Aktivgas-Schweißen (kurz MAG-Schweißen) und das Metall-Inertgas-Schweißen (MIG-Schweißen) gehören beide zur Gruppe des Metall-Schutzgasschweißens, welches in der Deutschen Industrie Norm 1910 wie folgt charakterisiert wird: „Der Lichtbogen brennt zwischen einer abschmelzenden Elektrode, die gleichzeitig Schweißzusatz ist, und dem Werkstück. Das Schutzgas ist inert (MIG/131) oder aktiv (MAG/135). Es besteht z.B. beim CO_2 -Schweißen (MAGC) aus Kohlendioxid oder beim Mischgasschweißen (MAGM) aus einem Gasgemisch. Der MIG-Prozess eignet sich für höher legierte Stähle sowie Nichteisen-Metalle und deren Legierungen, während der MAG-Prozess zum Schweißen unlegierter und niedriglegierter Stähle eingesetzt wird.“²⁷.

4.1 Verfahrensprinzip des MAG-Schweißens

4.1.1 Einleitung

Wie auch beim WIG-Schweißverfahren wird bei jedem Schutzgasschweißverfahren, der Schutz der Schweißstelle vor der Oxidationswirkung durch Gas gegeben. Der wesentliche Unterschied zwischen dem WIG und den beiden Metall-Schutzgasschweißverfahren (MAG und MIG) ist, dass beim WIG-Verfahren die Elektrode nicht abschmilzt und der Schweißzusatz separat hinzugefügt werden muss. Die beiden Metall-Schutzgasschweißverfahren wiederum unterscheiden sich voneinander durch die Verwendung von verschiedenen Gasarten. Während beim Metall-Aktivgas-Schweißen (MAG) aktives Gas verwendet wird, wird beim Metall-Inertgas-Schweißen (MIG) inertes Schutzgas verwendet. In ihren Verfahrensmerkmalen unterscheiden sich diese beiden Verfahren nicht wesentlich voneinander. Das Verfahrensprinzip beruht auf einer Drahtelektrode, welche kontinuierlich dem Schweißbrenner zugeführt wird und im Lichtbogenstrahl abgeschmolzen wird. Auf diese Weise erfüllt die Drahtelektrode den Zweck des Schweißzusatzes.

Das Abschmelzen der Elektrode, welche somit auch als Schweißzusatz fungiert, bewirkt folgende zwei Vorteile gegenüber dem WIG-Verfahren:

- a) Die Einsparung eines explizit zugeführten Drahtes; dem Schweißzusatz ermöglicht eine weitaus platzsparendere Konstruktion und vereinfacht die Handhabung wesentlich.
- b) Die innere Führung des Schweißzusatzes als Elektrode vereinfacht die Koordinierung und Ansteuerung bei der Automation.

²⁷ Fahrenwaldt und Schuler, *Praxiswissen Schweißtechnik*, 65.

4.1.2 Allgemeine Funktionsweise

Es sei nun unabhängig von der Gasart (inert bzw. aktiv) das Verfahrensschema kurz erklärt.

Über eine Spule wird eine drahtförmige Elektrode zum Kontaktrohr geführt, erst dort erfolgt die Stromzufuhr. Sinn dieser Bereichsabgrenzung ist es, eine hohe Strombelastung über einen kleinen Bereich der Drahtelektrode zu erreichen. Die doppelte Verwendung des Drahtes erleichtert die Handhabung des Schweißbrenners. Zum Einsatz kommt ausschließlich Gleichstrom, wobei die Drahtelektrode am Pluspol liegt. Die Zündung des Lichtbogens findet, wie auch beim WIG-Verfahren, über einen Kurzschluss statt. Da das Schutzgasschweißen keinen Lichtbogenstabilisator besitzt, wie er beispielsweise beim Unterpulverschweißen - also leicht ionisierbaren Metallverbindungen - vorkommt, wird nur Gleichstrom verwendet. Somit wird ein Erlöschen nach Durchlaufen des Nulldurchganges gewährleistet. Um die konzentrische Ausströmung des Schutzgases und somit eine intakte Schutzatmosphäre zu gewährleisten, wird das Kontaktrohr wie auch die Drahtelektrode der Gasdüse eingeschlossen.

Die Bedeutung der Schutzatmosphäre wurde in den vorherigen Kapiteln bereits beleuchtet. Angemerkt sei aber, dass das Schutzgasatmosphäre eine Abschirmung der Schweißstelle gleich kommt. Aus dieser Abgrenzung resultiert eine hohe Wärme- und Lichtstrahlung in der näheren Umgebung des Lichtbogens. Es ist daher nur bei geringen Stromstärken auf eine Wasserkühlung zu verzichten, welche wie auch der Schweißstrom, die Drahtelektrode, und das Schutzgas über ein Schlauchpaket hinzugeführt wird.

4.1.2.1 Schutzgase

Die einzige Unterscheidung zwischen MAG und MIG-Verfahren ist die die Klasse des verwendeten Schutzgases.

Das Schutzgas hat beim Schutzgasschweißen grundsätzlich folgende Aufgaben:

- Beeinflussung des Einbrandes
- Beeinflussung der Metallurgie
- Steigerung der Schweißleistung
- Schutz
- Beeinflussung der Zündefigenschaften des Lichtbogens
- Beeinflussung der Stabilität und der Form des Lichtbogens

Schutzgase müssen keine reinen Gase sein, es kommen auch Mischgase als Schutzgase zum Einsatz. Neben der Unterscheidung ob es sich um Mischgase oder reine Gase handelt wird wie bereits angesprochen unterschieden in inerte Gase und chemisch aktive Gasen bzw. deren Gemische. Wie auch bei den anderen MSG-

Schweißverfahren, muss das Schutzgas unter einem bestimmten Druck in bestimmter Menge je Zeiteinheit zugeführt werden. Dabei ist besonders auf einen angemessenen Betriebsdruck zu achten, der über beschriebene Druckminderer erreicht wird.

$$q = 10 * (\pi * \frac{r^2}{2})$$

Die obenstehende Formel ermöglicht eine überschlägige Ermittlung der notwendigen Schutzgasmenge q in Litern pro Minute. Dabei steht die Variable r für den Radius der verwendeten Drahtelektrode.

Inertgase

Sie bieten sich besonders zum Schutzgasschweißen an, da sie keine unerwünschten Reaktionen mit den zu verschweißenden Metallen zulassen. Sie werden daher auch als chemisch inaktiv bezeichnet. Grund dieser Inaktivität ist die Sättigung ihrer äußersten Elektronenschale, wie sie nur bei Edelgasen zu sehen ist. Es sei aber kurz daran erinnert, dass unter den inerten Edelgasen vor allem Argon und Helium aus Kostengründen die meiste Verwendung finden. Prinzipiell eignen sich inerte Gase für alle Schweißverfahren und alle Werkstoffe, jedoch haben sie den Nachteil, dass sie aus Kostensicht viel teurer als Aktivgase sind. Während des Schweißens mit abschmelzenden Drahtelektroden ist das Abbrennen teurer Legierungselemente unerwünscht, da sie sonst nicht mit in das Schweißbad aufgenommen werden können. Daher werden Nichteisenmetalle fast ausschließlich unter inertem Gas geschweißt. Hochlegierte Stähle werden durch geringeren Sauerstoffgehalt des Gases nicht weiter beeinträchtigt. Für niedriglegierte Stähle wird Aktivgas eingesetzt. Tatsächlich haben in der Praxis die Gaskosten in der Fertigung, aber einen geringen Anteil, da die Lohn- und Anlagenkosten ausschlaggebend sind. Daher kommen inerte Gase trotz ihrer vergleichsweise hohen Kosten zu aktiven Gasen in großen Maßen zum Einsatz.

Argon hat durch seine gute Ionisierbarkeit einen positiven Effekt auf den Lichtbogen, es ermöglicht ein ruhiges Brennen. Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des Argons bildet sich ein heißer, stromführender Lichtbogenkern aus. Dieser sorgt insbesondere beim MIG-Schweißen mit hoher Stromstärke für einen tiefen, fingerförmigen Einbrand, dem sogenannten Argonfinder. Neben diesem Einbrand existiert auch noch ein flacher und breiter Seiteneinbrand.

Helium, welches im Vergleich zum Argon eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit hat, bewirkt dadurch eine gleichmäßigere radiale Wärmeverteilung im Lichtbogen. Dieser Vorteil wird von einem höheren Wärmeverlust an die Umgebung überschattet. Die elektrische Leitfähigkeit des Lichtbogens ist jedoch geringer. Da Helium auch ein höheres Ionisationspotential aufweist, muss gegenüber Argon mit höherer Lichtbogenspannung geschweißt werden, was eine größere Wärmeeinbringung in das Schmelzbad bewirkt. Somit entsteht ein heißeres Schmelzbad und damit

geringere Viskosität. Letzterer Umstand fördert eine verbesserte Entgasung des Schmelzbades und kann somit das Auftreten des fingerförmigen Einbrandes verhindern. Begünstigt durch die größere Wärmeeinbringung ergibt sich eine gute Eignung zum Schweißen von Metallen mit hoher Wärmeleitfähigkeit (Kupfer, Aluminium etc.). Überdies hat Helium gegenüber Argon die Möglichkeit einer Steigerung der Schweißgeschwindigkeit. Nachteilig ist wiederum, dass die geringere Dichte eine hohe Ausströmgeschwindigkeit des Heliums und somit einen höheren Gasverbrauch mit sich zieht.

Aktivgase

Sie sind vor allem durch den Einsatz von Sauerstoff oder Kohlendioxid (CO_2) geprägt. Diese beiden Hauptkomponenten begünstigen chemische Oxidationsreaktionen an der Schweißstelle, und werden anderen Schutzgasen beigemischt. Diese Oxidationsreaktionen können positive als auch negative Effekte auf das Schweißbad und in weiterer Folge auf die Schweißnaht nach sich ziehen. Eine mögliche Komponente eines Aktivgases ist Wasserstoff. Auf Grund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Wasserstoffes hat dieser eine ähnliche Wirkung auf Einbrandformen und Schweißgeschwindigkeit wie Helium. Es besteht die Gefahr von Porenbildung, weswegen Wasserstoff auch bei Aluminium nicht eingesetzt wird. Selbiges gilt bei hochlegierten Stählen, hier wird der H-Anteil bis auf 7 % beschränkt. Als zweiatomiges Gas wird H_2 im Lichtbogen unter Wärmeaufnahme in H^+ -Ionen ausgeschieden und rekombiniert auf der relativ kalten Werkstückkontaktfläche wieder zu H_2 . Somit ist eine gute Übertragung der Lichtbogenenergie gewährleistet.

Sauerstoff als Mischgaskomponente ist in der Lage die Oberflächenspannung von Stahl herab zu setzen. Woraus sich ein feintropfiger Werkstoffübergang ergibt, welcher durch eine flachere und feingeschuppte Schweißnaht begünstigt wird. Ein weiterer Vorteil ist, dass es wie Wasserstoff ausgeschieden und am Werkstück wieder rekombiniert wird. Vergrößert sich der Anteil von O_2 in Schutzgas (von 8 bis 12 %), so muss wie beim Schweißen mit CO_2 ein erheblicher Abbrand von Legierungselementen einkalkuliert und berücksichtigt werden.

Kohlendioxid (CO_2) wiederum hat den Vorteil eine hohe Sicherheit gegen Porenbildung bieten zu können, wobei es tiefe und runde Einbrände verursacht. Die hohe Wärmeleitfähigkeit in den weniger heißen Randbereichen des Lichtbogens (3000 K) begünstigt ein Zustandekommen einer Kontraktion des stromführenden Kerns und somit eine hohe Energiedichte, der Grund eines tiefen Einbrandes. CO_2 wird wie folgende Reaktionsgleichung erklärt im Lichtbogen ausgeschieden:



Die Rekombination an dem in Relation kühleren Werkstück gibt wieder Wärme frei. Das MAG-Schweißen mit Kohlendioxid (kurz: MAGC-Schweißen) ermöglicht eine Arbeit mit einer höheren Spannung als beim MIG-Schweißen unter Argon, wodurch die im Lichtbogen erzeugte Wärmeleistung größer wird, und somit auch die Schweißleistung erhöht. Beide Faktoren erzeugen ein heißes Schmelzbad und eine Verbreiterung des Einbrandes. Ein heißeres Schmelzbad verbessert das Entgasen und trägt somit zur Porensicherheit des MAGC-Verfahrens bei. Der größte Nachteil in der Verwendung von CO_2 ist das erhöhte Abbrandrisiko. Durch die Rekombination wird Sauerstoff frei, welcher einen hohen Abbrand verursacht. Es sind auch Reaktionen mit anderen Gasen zu beobachten. Das Kohlenmonoxid führt zu einer Aufkohlung der Schmelze, weshalb reines Kohlendioxid nur zum Schweißen von un- und niedriglegierten Stählen verwendet werden kann. Daher dient als Desoxidationsmittel für unlegierte Stähle nur Mangan. Der Lichtbogen wird bei der Verwendung von CO_2 durch die Wirkung der oxidierenden Aktivgas-Komponenten wie O_2 und CO_2 sehr gut stabilisiert. Nachteilig ist, dass eben diese Aktivgas-Komponenten eine Bildung von Metalloxiden auf der Oberfläche des Schweißbades und in weiterer Folge auf der Schweißnaht verursachen. Diese Oxidschicht wiederum weist gegenüber den Metallen eine geringere Ionisationsenergie auf und gewährleistet eine Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit des Lichtbogens. Andererseits ist zu beobachten, dass durch die Bildung eben dieser Oxidschichten die Lagenüberschweißbarkeit verschlechtert wird, und eine Nachbearbeitung im Falle eines Mehrlagenschweißens zwingend notwendig wird. Diese Aktivgas-Komponenten sind auch für ein dünnflüssiges Schmelzbad und die Reduzierung der Oberflächenspannung der Schmelze verantwortlich. Wichtig für das Benetzungsverhalten, d.h. das Anfließen des Schmelzbades an die Nahtflanken, ist ein ausreichendes Vorwärmen der Nahtflanken. Die höhere Temperatur verzögert die Erstarrung, wodurch das flüssige Schweißgut länger ausfließen kann. Die Vorwärmung der Nahtflanken wird durch den Einsatz von Gasen mit guten Wärmeübertragungseigenschaften erreicht. Der Effekt beruht auf der Dissoziation und Rekombination von molekularen Gasen, der Übertragung der Energie des Lichtbogens auf das Gas und der Übergang der Energie auf den Werkstoff. All diese Faktoren werden in der Wärmeübergangszahl ausgedrückt. Wasserstoff bewirkt zudem noch eine Einschnürung des Lichtbogens, was das Schweißen in Zwangslagen bzw. eine höhere Schweißgeschwindigkeit ermöglicht.

Mischgase

Es gibt drei Gruppen von Mischgasen: M1, M2 und M3. Den größten Anteil liefern die sogenannten Basisgase. Ein solches Basisgas ist Argon. Weitere Komponenten sind Kohlendioxid und Sauerstoff. Die zuvor genannte Gruppenteilung in M1, M2, M3 bezieht sich auf den Gehalt der weiteren Komponente, des CO_2 . Im Falle von M1 liegt dieser bei 0 bis 5 %; er steigt bei Gruppe M2 auf 5 bis 10 %; bei Gruppe M3 beträgt

er 25 bis 50 %. Zusätzlich tritt auch Sauerstoff als dritte Komponente auf. Ihr Anteil nimmt ebenfalls von M1 bis M3 zu. Neben den Gruppen M1, M2 und M3 besitzt jede Gruppe Untergruppen mit der Komponente CO_2 , aber ohne Sauerstoff (M11, M12, M21, M31), wie auch mit der Komponente Sauerstoff aber ohne CO_2 (M13, M22 und M32). Diese Untergruppen sind genauso wie die Hauptgruppen der Mischgase genormt. Durch sauerstofffreie Mischgase erzielt man ein günstigeres Einbrandprofil, bei höheren CO_2 -Gehalten ohne den "Argon-Finger". Dünne Drähte bewirken eine feintropfige Schmelze, dicke Drähte eine grobtropfige. Schweißspritzer sind wegen des nichtaxialen Tropfenübergangs charakteristisch. Eine höhere Stromstärke ermöglicht, aber auch bei dickeren Drähten einen feintropfigen und spritzerarmen Tropfenübergang im Sprühlichtbogen.

Einsatzgebiete für CO_2 -freien Mischgase mit Sauerstoff sind hochlegierte Stähle. Bei jenen in denen ein dünnflüssiges Schmelzbad und einen spritzerfreien Tropfenübergang erreicht werden soll, und damit eine flache, glatte und kerbfreie Naht. Das Schweißen von hochlegierten austenitischen Stählen wird der Typ M22 verwendet und somit z. B. eine maximale Heißrissicherheit wie auch eine höhere Schweißleistung erzielt werden. Sie weisen einen höheren Oxidationsfaktor gegenüber den Gasen der Gruppe M1 auf. Für das MAG-Schweißen niedriglegierter Stähle werden bevorzugt Gase dieser Gruppe eingesetzt. Durch entsprechende Wahl des CO_2 -Anteils können sowohl kleine als auch mittlere und große Blechdicken verschweißt werden. Eine weitere Untergruppe ist die Gruppe der Dreikomponenten-Mischgase (M14, M23, M24 und M33), in denen bevorzugt die Argon(Ar) zusätzlich zum CO_2 - O_2 -Gemische (M23 und M24) verwendet wird. Geeignet sind diese Gase für niedriglegierte Stähle, für hochlegierte Stähle allerdings nur bedingt einsetzbar. Das Zumischen von O_2 verhindert bis zu einem gewissen Maße die Spritzerbildung, und erzeugt so ein gutes Einbrandprofil. Es entsteht ein feintropfiger, spritzerarmer Werkstoffübergang. Bei hohem Argon-Anteil sind diese Mischgase besonders gut für Anwendungen mit Impulslichtbogen geeignet.

4.1.2.2 Lichtbogenarten

Die verschiedenen Lichtbogenarten stellen sich je nach Wahl des Schutzgases und der Schweißparameter ein. Im Folgenden seien die wichtigsten Vertreter kurz vorgestellt.

Kurzlichtbogen

Er ist charakteristisch für das Schweißen mit geringer Wärmeeinbringung. MIG- und MAGC-Verfahren ermöglichen seine Entstehung. Während der Lichtbogen brennt (auch Lichtbogenbrennzeit genannt) wird der Grundwerkstoff aufgeschmolzen. Dabei löst sich aber kein Tropfen von der Elektrodenspitze. Erst durch die kontinuierliche Drahtzufuhr und den damit unterstützten Tropfenwachstum kommt es zum

Kurzschluss zwischen Elektrode und Schmelzbad. Es ist der daraufhin fließende hohe Kurzschlussstrom der einen Tropfen abschnürt. Der Werkstoff geht ausschließlich in der Kurzschlussphase über. Durch das Abschnüren, entsteht wieder ein durch Metaldämpfe ionisierter Spalt, so dass der Lichtbogen neu zünden kann. Bei dem Schweißen mit diesem Lichtbogen entsteht also stets eine mehr oder weniger regelmäßige Abwechslung zwischen Zündung und Erlöschen des Lichtbogens. Die Frequenz der Tropfenbildung und der Tropfengröße hängt vom Werkstoff, der Schutzgaszusammensetzung, der Stromdichte und der Schweißspannung ab. Es lässt sich bei dieser Lichtbogenart kein Schweißspritzer vermeiden. In der Abbildung 27. ist eine Gegenüberstellung des Kurzlichtbogens zum Sprühlichtbogen gegeben. Charakteristisch für den Kurzlichtbogenprozess ist seine geringe Wärmeeinbringung, eben diese führt zur Entstehung eines kleinen und zähflüssigen Schmelzbad. Daher liegt die Anwendung dieses Prozesse vorwiegend beim Schweißen von dünnen Blechen, von einseitigen Wurzellagen an dickeren Blechen und beim Schweißen in Zwangspositionen.

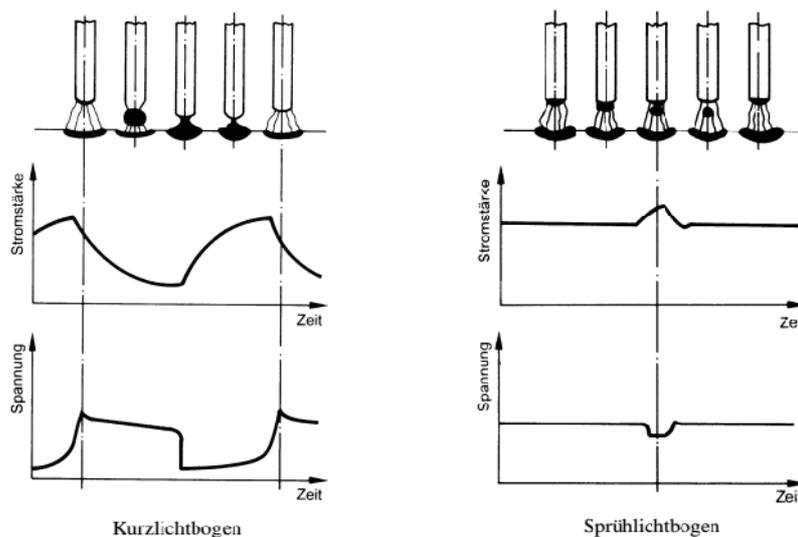


Abbildung 27:
Gegenüberstellung:
Kurzlichtbogen
zu
Sprühlichtbogen

Sprühlichtbogen

Die Tropfenfrequenz steigt unter CO_2 nur allmählich mit der Stromdichte an. Unter Argon, Helium und ihren argon/helium-reichen

Mischgasen (Gehalt mindestens 80 %) und unter Berücksichtigung einer bestimmten notwendigen kritischen Stromstärke, steigt die Tropfenfrequenz plötzlich stark. Der Werkstoffübergang wechselt vom kurzschlussbehafteten zum kurzschlussfreien, feintröpfigen Übergang, daher spricht man von einem Sprühlichtbogen (Abb. 27). Während des Vorganges der Tropfenbildung bleibt die Lichtbogenlänge nahezu konstant, und der zeitliche Verlauf von Schweißstrom und -spannung bleibt sehr gleichmäßig. Die Tropfenablösung selbst (bei kurzschlussfreiem Werkstoffübergang) wird durch magnetische Kräfte hervorgerufen (Abb.28). Diese werden nun kurz erklärt: Die Drahtelektrode ist wie jeder stromdurchflossene Leiter von einem konzentrischen Magnetfeld umgeben, dessen Kraftkomponenten radial nach innen gerichtet sind. Jene magnetischen Kräfte versuchen, den Leiter einzuschnüren. Im Englischen wird einschnüren „to pinch“ genannt, danach wurde auch der sich ergebende Effekt genannt, Pinch-Effekt. Diese Einschnürung stellt sich stets am

Drahtende ein, da dort ein verringerter Formänderungswiderstandes besteht. So ist eine Einschnürung nur an dem schmelzflüssigen Elektrodenende möglich, wo dann die Ablösung des Tropfens erfolgt. Die steigende Schweißspannung und die Oberflächenspannung reduzierenden Sauerstoffanteile im Argon fördern den sprühregenartigen Werkstoffübergang. Dabei sei angemerkt, dass der reduzierende Sauerstoffanteile im Argon, die kritische Stromstärke herabsetzen und so zum Sprühlichtbogen beiträgt. Das Schmelzbad selbst ist groß, überhitzt und damit dünnflüssig. Grund dafür ist die größere, im Prozess umgesetzte Energie. Geeignet ist diese Lichtbogenart besonders zum Schweißen dicker Bleche in Wannennlage bzw. horizontaler Position. Die entstehende Schweißnahtoberfläche ist glatt und flach.

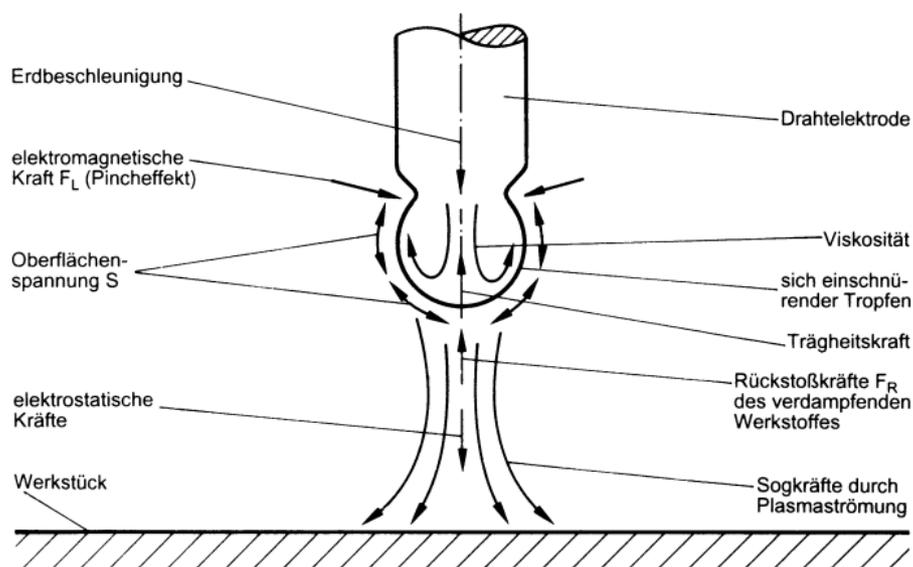


Abbildung 28: Kräfte im Lichtbogenraum²⁸

Rotationslichtbogen

Er stellt sich erst bei sehr hohen Spannungen ab etwa 39 V und Stromstärken von über 400 A ein (Abb.29). Zusätzlich mit einer sehr hohen Drahtvorschubgeschwindigkeit von 20 bis 45 m/min wird die Abschmelzleistung gegenüber dem herkömmlichen Lichtbogenarten erheblich gesteigert. Es resultiert eine sehr große Wärmeeinbringung, so dass der Anwendungsbereich des Verfahrens auf große Blechstärken beschränkt ist. Ersichtlich ist somit auch der Grund der Einführung; die weitere Leistungssteigerung und die damit verbundene Verbesserung der Wirtschaftlichkeit. Es wurde das Metall-Aktivgas-Hochleistungsschweißen mit Mischgas (MAGM-Hochleistungsschweißen) eingeführt, zunächst als patentiertes „T.I.M.E.“-Verfahren. Hauptsächlich wird das

²⁸ Diltthey, *Schweisstechnische Fertigungsverfahren. 1, 1., 81.*

MAGM-Hochleistungsschweißen im Textilmaschinenbau, Schwer- und Erdmaschinenbau sowie im Stahlbau eingesetzt.



Abbildung 29: Hochgeschwindigkeits-Aufnahme eines rotierenden Lichtbogens der Firma Messer²⁹

Die relativen langen freistehenden Drahtenden bewirken zusammen mit den hohen Schweißströmen eine starke Widerstandserwärmung. Diese Erwärmung des Drahtes findet bereits vor dem Erreichen des Lichtbogens statt, somit wird das freie Drahtende bereits zuvor erweicht. Die rotierende Bewegung des Werkstoffüberganges entsteht durch das seitliche Ausweichen des übergehenden Drahtmetalls. Dies weicht auf Grund des hohen Lichtbogendruckes aus, welcher am Ansatzpunkt des Lichtbogens entsteht. Die beschriebene rotierende Bewegung besitzt eine von den Schweißparametern abhängige Rotationsfrequenz. Diese Frequenz liegt gewöhnlich in einem Bereich zwischen 800 und 1000 Hertz. Es sei angemerkt, dass die Rotationsrichtung zufällig ist. Durch die Rotation ändert sich das Einbrandprofil und es ergeben sich breite Schweißnähte mit relativ flachen, wannenförmigen Einbrand. Es sind primär die Schweißparameter, wie die Schweißstromstärke, die Länge des freistehenden Drahtes, der Drahtdurchmesser und das Schutzgas, die entscheiden, ob sich ein Sprühlichtbogen zu einem rotierenden Lichtbogen ändert. Das Schutzgas selbst hat einen starken Einfluss auf die Bildung eines rotierenden Lichtbogens. Seine bestimmte Zusammensetzung ist Voraussetzung, damit ein rotierender Lichtbogen entstehen kann. Meist sind es 3 oder 4 Komponentengase (Argon, Helium, mit oder ohne Sauerstoff), welche günstig zur Plasmabildung sind.

Langlichtbogen

Auch bei diesem bedarf es einer kritischen Stromdichte, wie sie beim Sprühlichtbogen auftritt. Es sei angemerkt, dass die Erhöhung der Stromstärke bei einem gegebenen Drahtdurchmesser nur im geringfügigen Maße zu einer Zunahme der Kurzschluss- und somit der Tropfenfrequenz beiträgt. Erhöht man beim Langlichtbogenschweißen die Spannung auf Werte, welche über das Sprühlichtbogenschweißen üblich sind, so bewirkt man eine Senkung der Kurzschlusszahl. Es bilden sich große kurzschlussfreie Tropfen aus. Die Größe der Tropfen verursacht einen ungleichmäßigen Übergang, der mit einer starken Spritzerbildung einhergeht. Durch die verringerte Kurzschlusszahl und die große Tropfenbildung wird das Langlichtbogenschweißen gegenüber dem Kurzlichtbogenschweißen als instabiler Prozess gewertet. Die großen Tropfen

²⁹ „Messer | Schweiß- und Schneidgase“, zugegriffen 2. August 2014, http://www.messergroup.com/de/Produkte_und_Loesungen/gase/schweissgase/index.html.

verursachen ein grob-geschupptes Bild der Schweißnahtoberfläche. Die Naht ist in Relation zum Grundwerkstoff stark erhöht. Diese Effekte sind Zeichen einer geringeren Güte der Nahtoberfläche und ziehen stets eine notwendige Nachbearbeitung nach sich. Prinzipiell deckt sich das Einsatzgebiet mit dem des Sprühlichtbogens. Durch zwingende Nachbearbeitung hat sich aber der Einsatz von teuren Mischgasen durchgesetzt, der eine Ausbildung von Sprühlichtbogen und somit in Summe eine günstigere Fertigung erlaubt, als sie mit dem Langlichtbogen möglich wäre.

Impulslichtbogen

Bei diesem Verfahren wird in der Stromquelle periodisch zwischen zwei verschiedenen Kennlinien umgeschaltet. Dabei ist die erste Kennlinie der niedrige Grundstrom und die zweite Kennlinie der höhere Impulsstrom. Der Grundstrom sorgt für die Stabilität durch das Aufrechterhalten der Ionisation der Lichtbogenstrecke. Das geschieht durch die Vorwärmung des Drahtendes und des Werkstückes. In der Pulsphase, also während des Einsatzes der zweiten Kennlinie, erfolgt das Schmelzen des Elektrodenendes und somit der Werkstoffübergang. Die Tropfenfrequenz während einer Impulsdauer ist abhängig von den Schweißparametern. Diese sind Grund- und Impulsstrom, bzw. Spannung und zusätzlich die Impulsfrequenz, letztere hängt von der Grund- und Impulszeit ab. Die optimale Menge liegt bei einem Tropfen pro Impuls, da der Prozess so am stabilsten und spritzerärmsten ist. Der Impulsstrom selbst liegt dabei stets über der kritischen Stromstärke, sodass wie beim Impulslichtbogen ein kurzschlussfreier Werkstoffübergang erreicht wird. Für die Bildung eines Impulslichtbogens ist es wesentlich, dass das Schutzgas einen Inertgasanteil von mindestens 80 Prozent aufweist. Auf Grund der höheren Lichtbogenstabilität ist Argon zu bevorzugen. Die zuvor erwähnte Impulszeit lässt sich bei Transistorstromquellen bereits stufenlos einstellen. Dasselbe gilt für das Tastverhältnis. Dieses beschreibt die Relation von Pulsdauer zu Periodendauer, welches dann die Stromimpulsdauer bzw. die Grundphasenzeit festlegt. Das Schweißen von Zwangslagen bedarf einer guten Beherrschung des Schmelzbades und ist daher ein geeignetes Einsatzgebiet für das Impulslichtbogenschweißen. Weitere Einsatzgebiete erschließen sich durch die Möglichkeit der Verwendung von dicken Drahtelektroden für dünne Bleischweißungen. Die Schweißnahtoberfläche ist dabei beim Schweißen in Wannenlage dem Sprühlichtbogen ähnlich.

Impulslichtbogen-Zweidrahttechnologie

In den letzten Jahren hat sich im Zuge der Steigerung der Abschmelzleistung bei gleichzeitiger Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit das Zweidrahtschweißen, auch MSG-Zweidrahtschweißen genannt, durchgesetzt. Dabei werden Zweidrahtelektroden, welche durch eine gemeinsame Düse geführt werden, in

Schweißrichtung hintereinander angeordnet. Sie werden beide in demselben Schweißbad aufgeschmolzen, wobei der erste (also vordere) Draht einen Einbrand und der zweite eine Bildung der Nahtoberraupe bewirkt. Diese Vorgehensweise ist die allgemeine Form des Zwei-Drahtschweißens, man unterscheidet aber im Detail zwischen MSG- Doppeldrahtschweißen und dem MSG-Tandemschweißen. Beim MSG-Doppeldrahtschweißen wird ein Brenner mit einer runden Gasdüsengeometrie verwendet, in der auch die beiden parallel angeordneten Drahtelektroden in einem gemeinsamen Kontaktrohr geführt werden. So ist eine sehr kompakte Baustruktur möglich, was wiederum die Zugänglichkeit am Werkstück wesentlich verbessert. Nachteilig ist aber, dass beide Drähte an derselben Stromquelle geführt werden. So besitzen sie stets das gleiche Potential und sind anfällig für Prozessstörungen, welche vom ersten auf den zweiten Draht übertragen werden können. Die gemeinsame Stromquelle macht eine unabhängige Einstellung der Schweißparameter der einzelnen Drahtelektroden unmöglich. Die beiden Drahtelektroden zünden gemeinsam und beeinflussen sich so gegenseitig, durch elektromagnetische Effekte, die zu einer nicht geradlinig gerichteten Tropfenablösung führen.

Dem MSG- Doppeldrahtschweißen steht das MSG-Tandemschweißen gegenüber. Bei diesem ist die separate Einstellung der Schweißparameter für jede Drahtelektrode einzeln möglich. Grund dafür ist die Möglichkeit einer zeitlich versetzten Einleitung der Pulsphasen an jeder Drahtelektrode einzeln. So wird die Stabilität gesteigert und die Wechselwirkung zwischen den Lichtbögen gesenkt. Durch eine V-förmige Anordnung der einzelnen Kontaktrohre wird die Bildung von Einbrandkerben verhindert. Nachteilig ist die im Vergleich zu MSG-Doppeldrahtbrennern große Bauweise, welche die Zugänglichkeit am Werkstück stark einschränkt.

Impulslichtbogen-CMT-„Cold Metal Transfer“

Entwickelt und patentiert wurde dieses Schweißverfahren 2005 von dem österreichischen Schweißtechnik-Unternehmen Fronius. Das CMT-Verfahren resultierte aus einer stetigen Anpassung des MIG-/MAG-Schweißens und erlaubt einen gesteuerten, beinahe stromlosen Werkstoffübergang, der wesentlichen Kriterien der Prozess-Stabilität, Reproduzierbarkeit und Wirtschaftlichkeit entspricht. Dieses MSG-Schweißverfahren steht im Vergleich zu anderen herkömmlichen Verfahren für eine sehr geringe Wärmeeinbringung. Wesentlich an diesem Verfahren ist, dass der Draht nicht nur in Richtung des Werkstückes geschoben, sondern auch von diesem Weg gezogen wird. Der Grund sei kurz anhand des Kurzlichtbrenners erklärt. Im Zeitpunkt des Kurzschlusses steigt der Strom sehr stark an und sorgt für das Aufbrechen des Kurzschlusses (Abb.30). Er ist für das Wiederezünden verantwortlich. Dabei kommt es, durch den hohen Strom und die zufällige

Wiederzündung, zur vermehrten Spritzerbildung. Der in raschen Intervallen entgegen der Förderrichtung bewegte Schweißdraht, bewirkt einen exakt definierten Drahrückzug. Dieser ermöglicht eine kontrollierte Tropfenablöse, für einen sauberen, spritzerfreien Werkstoff-Übergang. Dabei erfolgt die Drahtbewegung in einer sehr hohen Frequenz und setzt einen reaktionsfreudigen, getriebelosen Drahtantrieb direkt am Schweißbrenner voraus. Diese oszillierende Drahtbewegung besitzt Frequenzen bis zu 70 Hertz und ist direkt in die Prozessregelung eingebunden. Der Kurzschluss bricht nicht unkontrolliert auf, sondern wird durch das Zurückziehen des Drahtes kontrolliert herbeigeführt. Dieser Umstand führt zu einer niedrigen Wärmeeinbringung mit praktisch spritzerfreien Schweißnähten. Einer solchen schnellen Bewegung kann der Haupt-Drahtvorschub nicht folgen, daher ist der Draht-Förderschlauch mit einem so genannten Drahtpuffer versehen, der die zusätzliche Hin- und Herbewegung des Drahts ausgleicht.

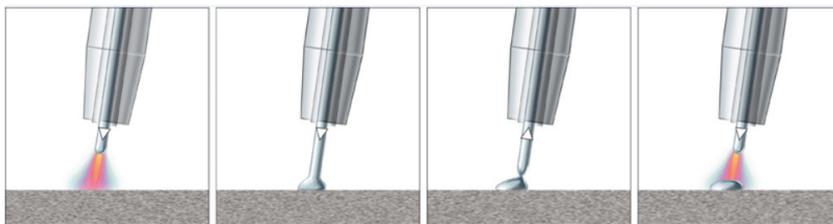


Abbildung 30: Schema CTM-Verfahren - Fronius³⁰

Zum Einsatz kommen hier ausschließlich

volldigitale Inverter-Stromquellen. Vom Geräteaufbau her gleicht dieses Verfahren, bis auf die Besonderheit des hochdynamischen Drahtantriebs direkt am Schweißbrenner, sehr stark dem MAG/MIG-Verfahren. Sobald die Stromquelle einen Kurzschluss erkennt, wird eine Rückwärtsbewegung des Schweißdrahts gestartet, bei gleichzeitig abgesenktem Schweißstrom. So löst sich exakt ein Tropfen, und es kann die geringste Spritzerbildung vermieden werden. Im direkten Anschluss bewegt sich der Schweißdraht wieder vorwärts, und der Zyklus beginnt von Neuem. Unumgänglich sind hohe Frequenz und äußerste Präzision für einen absolut kontrollierten Werkstoffübergang. Die Nachförderung erfolgt daher noch immer durch einen stärkeren, jedoch trägeren Haupt-Drahtvorschub. Vorteil dieses Verfahrens ist eine sehr hohe Schweißgeschwindigkeit bei kleiner (Dünnblech-Schweißungen 0,3 – 0,8 mm) bis mittlerer Leistung und hoher Präzision. Wie in Abb.31 zusehen ist entstehen, auf die Blechstärke angepasst, fast von Nachbearbeitung freie Schweißnähte, so wie auch bei diesem gezeigten Stumpfstoß. Von Vorteil sind nicht nur die äußerst geringen Verzüge, die sich ergeben. Durch den geringen Wärmeeingang des CMT-Verfahrens ist es möglich auf eine Badstütze, ohne dass die Schweißnaht durchfallen würde, zu verzichten. Besonders interessant ist dieses Verfahren für das Verschweißen von Edelstählen und Magnesium.

³⁰ „Fronius International GmbH - Fokus Schweißen - Grundlagen Schweißtechnik“, zugegriffen 2. August 2014, http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-0AFF0106-BF973F5A/fronius_international/hs.xsl/79_9399_DEU_HTML.htm#.U90sorGKPIU.

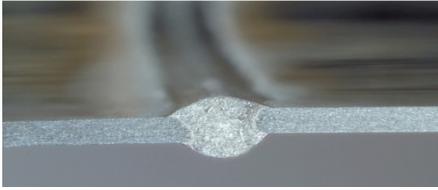
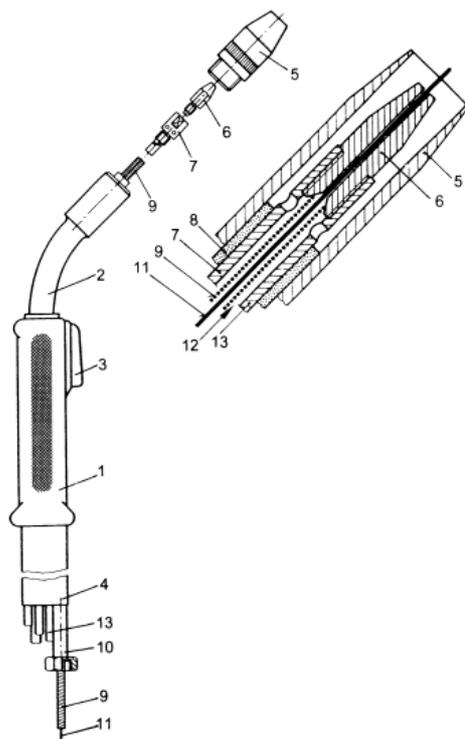


Abbildung 31: Stumpfnahz zweier Aluminium Bleche - Fronius³¹

4.1.2.3 Schweißanlage

Mittlerweile sind Universalanlagen mit separaten Drahtvorschubkoffern in der Industriestandard. Wenn mit Kohlendioxid (MAG) geschweißt wird, so bedarf es eines Vorwärmers zwischen den Schutzgasflaschen und den Druckminderern. Grund ist das Kohlendioxid beim Expandieren der Umgebung so viel Wärme entzieht, sodass die Ventile einfrieren könnten. Im Schlauchpaket wird die Schutzgasführung, Drahtführungsseele, Stromzufuhr, Kühlwasserschlauch für die Kühlung der Kontaktrohre und die Schutzgasdüse geführt. Die Abbildung 32 zeigt den nummerierten und bezeichneten Aufbau eines MAG-Handsweißbrenners.



1 Brennergriff; 2 Brennerhals; 3 Brennerschalter; 4 Schlauchpaket; 5 Schutzgasdüse
6 Stromkontaktrohr; 7 Kontaktrohrbefestigung; 8 Isolator; 9 Drahtführungsseele;
10 Führungsrohr; 11 Drahtelektrode; 12 Schutzgaszufuhr; 13 Schweißstromzufuhr

Abbildung 32: konventionelle Bauform eines Schutzgas MAG-Brenners³²

Das Kontaktrohr dient der Übertragung des Stromes auf die Drahtelektrode. Die simpelste Art eines Drahtvorschubsystems ist ein Zwei-Rollen- Antrieb, der den Draht von einer Haspel abzieht und in einem Schlauchpaket befördert. Zur Reduzierung des Schlupfes wurde auch ein auf demselben Prinzip basierendes Vier-Rollen-System entwickelt. Für höhere Ansprüche an die Gleichmäßigkeit des Drahtvorschubes wird das Push-Pull-Drahtvorschubsystem

³¹ „Fronius International GmbH - Fokus Schweißen - Grundlagen Schweißtechnik“, zugegriffen 2. August 2014, http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-4AA344EF-0C9BC7B9/fronius_international/hs.xml/79_817_DEU_HTML.htm#.U9ziTrGKPIU.

³² Heinrich Dubbel, „DUBBEL interaktiv 2.0 das elektronische Taschenbuch für den Maschinenbau; (Springer, 2002), 93.

eingesetzt. Dabei wird ein Drahtvorschub an der Stromquelle, und eine weitere im Schweißbrenner platziert. Bei geeigneter Abstimmung der Geschwindigkeit beider Antriebe wird eine hohe Gleichmäßigkeit erreicht.

4.1.2.4 Schweißstromquellen

Es gibt verschiedene Arten von Schweißstromquellen. Im folgenden Abschnitt soll zuerst ein kleiner Überblick über die verschiedenen Stromquellen gegeben werden, bevor ausgewählte im Detail erläutert werden.

- Die simpelste Bauform sind Transformatoren ohne Gleichrichter, mit einer variablen Streuung des Magnetfeldes. Diese Steuerung wird durch einen verstellbaren Transformatorjoch gewährleistet, damit der gewünschte Schweißstrom erzielt wird. Vorteil ist, dass diese Stromquellen sehr günstig jedoch auf Wechselstrom beschränkt und so nicht für alle Drahtelektroden geeignet sind. Hinzu kommt ihre beträchtliche Baugröße. Daneben gibt es noch einen Kühler für den Brenner und die Schutzgassteuerung.
- Thyristor-Stromquellen besitzen einen Gleichrichter, dessen Aufgabe es ist aus Wechselstrom den notwendigen gleichgerichteten Schweißstrom zu erzeugen. Dabei erfolgt die Stromregelung über die ansteuerbaren Schaltelemente des Gleichrichters, den Thyristoren. Diesen nachgesetzt ist eine Drosselpule, welche die unerwünschten Stromstärke-Spitzen glättet und dadurch die Neigung zu Schweißspritzern senkt. Diese Stromquelle bietet bereits tauglichen „Gleichstrom“ und ist gut zu steuern. Nachteil ist jedoch die Größe, ein langsamer Regelungsprozess und die Tendenz zur Empfindlichkeit gegenüber Netzschwankungen.
- Gebräuchlich sind Inverter-Stromquellen, welche aus der Netzspannung eine gepulste Spannung mit hoher Frequenz erzeugen, diese Spannung gelangt, dann an den Schweißtransformator. Der auf Grund der hohen Frequenz viel leichter, kompakter und effizienter ausgeführt werden kann. Auch diese Stromquelle verfügt über einen Gleichrichter, wobei die geringe Welligkeit des Transformator-Ausgangsstroms eine wesentlich kompaktere Ausführung oder einen vollständigen Entfall der Ausgangsdrossel erlaubt.

Für den Impulslichtbogen werden vergleichsweise aufwendige Stromquellen benötigt. Dabei wird bei der einfachsten Form mit zwei getrennten Stromquellen gearbeitet (Grund und Impulsstrom). Parallel zum Grundstrom liefert eine netzseitig einphasig angeschlossene Stromquelle über Thyristoren die Stromimpulse, und so den Impulsstrom. Bei konventionellen Thyristorstromquellen sind die diskreten Impulsfrequenzen auf 50 Hz beschränkt. Durch die Einführung leistungsfähiger Transistoren wurde der Aufbau analoger Transistorstromquellen möglich. Dabei wird die Impulsfrequenz nicht mehr aus der Netzfrequenz abgeleitet, sondern durch einen separaten Impulsgenerator erzeugt. Sinnbildlich funktioniert ein analoge Transistorstromquelle nach dem Prinzip eines Audio-Verstärkers, es wird ein schwaches Eingangssignal möglichst verzerrungsfrei auf einen hohen Pegel verstärkt wird. Wie auch die meisten Stromquellen besitzt auch eine Transistorstromquelle einen Drehstromtransformator, jedoch im Allgemeinen mit nur

einer Sekundäranzapfung, deren Spannung durch Siliziumdioden in Vollwellenschaltung gleichgerichtet wird, durch Kondensatoren geglättet und über eine Transistorkaskade dem Lichtbogen zugeführt wird. Nachteilig ist die hohe Differenz von Quellenspannung zur Schweißspannung, welche an der Transistorkaskade abfällt und dort eine relativ hohe Verlustleistung erzeugt. Diese muss in der Regel mit Wasser gekühlt werden. Über diesen Aufwand wird hinweg gesehen, da solche Stromquellen über sehr kurze Reaktionszeiten (30 bis 50 μs) verfügen. Wie in der klassischen Regelungstechnik kann auch diese Stromquelle durch eine Prozessrückführung beeinflusst bzw. geregelt werden. Die Entwicklung der analogen Transistorstromquellen trieb die konsequente Trennung von Leistungsteil (Transformator und Gleichrichter) und elektronischer Steuerung voran. Die Steuerung regelt den Schweißprozess durch Abgleich der Ist-Werte mit den vorgegeben Soll-Werten.

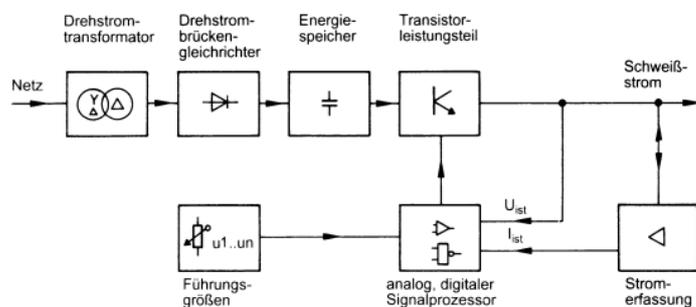


Abbildung 33: Analoge elektronisch geregelte Stromquelle³³

Eine „Inverter“-Stromquelle ist primär getaktet und unterscheidet sich grundsätzlich von den zuvor

genannten Schweißmaschinen. Bei der aus dem Netz kommenden Spannung (auch Versorgerspannung genannt), handelt es sich um eine Wechselspannung von 50 Hz, sie wird gleichgerichtet und geglättet. Im Anschluss wird sie über steuerbare Transistor- oder Thyristorschalter in eine mittelfrequente Wechselspannung (rd. 25-50 kHz) umgerichtet. Nach dieser Umrichtung wird diese Wechselspannung durch einen Transformator auf die Schweißspannung heruntertransformiert und über einen zweiten Gleichrichter (Sekundärgleichrichter) dem Schweißprozess zugeführt. Wesentlich ist, dass in diesem Verfahren die Schaltfrequenz eine bedingte Oberwelligkeit aufweist, welche der Grund des Vorteils ist, dass Inverterstromquellen ein geringes Gewicht haben. Denn ein Transformator, der eine Spannung bei einer Frequenz von 20 kHz umspannt, hat gegenüber einem 50 Hz-Transformator wesentlich geringere Magnetisierungsverluste, daher fällt seine Baugröße auch entsprechend kleiner aus. Man kann hier von einer Gewichtseinsparung von 90 Prozent im Vergleich zu einem 50 Hz-Transformator sprechen.

In den letzten Jahren sind analoge Quellen fast völlig vom Markt verschwunden, und wurden durch primär getaktete „Inverter“ Stromquellen fast zur Gänze ersetzt.

³³ Grote u. a., *Dubbel*, 95.

4.1.3 Anwendungsgebiet

Das MAG- bzw. MIG- Verfahren gehört heute zu den am häufigsten eingesetzten Schweißverfahren. Ihre Leistungsfähigkeit im Bereich der Abschmelzleistung und Einbrandtiefe ist mit dem Lichtbogenhand- und Unterpulver-Schweißen zu vergleichen. Die besagte Abschmelzleistung liegt abhängig vom verwendeten Lichtbogen zwischen weniger als 1 kg/h (Kurzlichtbogen) bis zu 20 kg/h bei Hochleistungsanlagen mit dem Sprühlichtbogen. Gebräuchlich sind dabei Drahtelektrorendurchmesser von 0,8 bis 1,6 mm. Zwar können diese Verfahren nur unter Schutzatmosphäre (Bspw. nicht Baustellen ohne Windschutz) durchgeführt werden, dennoch besitzen sie insgesamt größere Anwendungsmöglichkeiten als die des UP- und des Lichtbogenhandschweißens. Diese beiden MSG-Verfahren können teil- und vollmechanisiert sowie automatisch betrieben werden. Ihre Stromstärkebereiche liegen je nach Drahtdurchmesser-Abhängigkeit für Kurz- oder Impulslichtbogen etwa 40 A, für Rotationslichtbogen über ca. 400-600 A.

Von Vorteil ist die direkte Beobachtungsmöglichkeit der Schweißstelle, da dies auch das Schweißen sehr kurzer und stark gekrümmter Nähte ermöglicht. Wie später im Forschungsprojekt zu sehen ist, wird gerade aus diesem Grund das MAG-Verfahren verwendet. Die Beobachtungsmöglichkeit ist auch Grundlage einer guten Kontrolle der Schweißung. Die Abstimmung der Lichtbogenart, des Schutzgases und der weiteren Schweißparameter machen Schweißungen in nahezu allen Positionen, sowohl für dünne Bleche mit 1 mm Wanddicke, als auch jene bis zu mehreren hundert Millimetern (CMT) möglich. Daher ist das Einsatzgebiet dieser Schweißverfahren von der Reparatur in Handwerksbetrieben (Karosseriebau) über die Einzelfertigung von Großbauteilen bis zur Serienfertigung kleiner und mittelgroßer Bauteile für die Schiffs- bzw. Raumfahrt. Somit überspannen sie alle Industriezweige. Speziell geeignet sind diese beiden Verfahren aufgrund ihrer hohen Flexibilität und der kompakten Bauweise des Brenners, für den Einsatz mit Robotern.

5 Laserstrahlschweißen

5.1 Verfahrensprinzip des Laserstrahlschweißens

Schweißen mit dem Laser bietet eine Reihe von Vorteilen:

- hohe Leistungsdichte
- Werkstücke werden berührungslos mit hoher Geschwindigkeit geschweißt
- schlanke Nahtgeometrie bei großer Tiefe/Breitenverhältnis
- kleiner Strahldurchmesser
- nur geringer Verzug
- geringe Streckenenergie, sehr schmale Wärmeeinflusszone, geringe thermische Belastung des Werkstücks
- Schweißen unter Atmosphäre möglich
- Schweißungen auch an schwer zugänglichen Stellen des Werkstücks ausführbar
- geringe Spritzerbildung, gute Nahtoberfläche
- hoher Automatisierungsgrad

Für das Schweißen mit dem Laser kommen hauptsächlich der CO_2 -Laser und der Nd:YAG bzw. Diodenlaser zum Einsatz, da diese die erforderlichen Leistungen auch im cw (continuous wave = Dauerstrichbetrieb) erbringen können. In der Schweißtechnik eingesetzte Hochleistungslaser verfügen über Wirkungsgrade von 3-15%, Diodenlaser auch darüber.

5.1.1 Einleitung

Das Wort „LASER“ steht für „Light amplification by stimulated emission of radiation“, was zu Deutsch „Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung“ bedeutet. Durch die Benennung wird klar, dass ein Laser Licht generiert und dieses verstärkt. An dieser Stelle sei erwähnt, dass das Wort Licht, welches im alltäglichen Sprachgebrauch verwendet wird, aus physikalischer Sicht elektromagnetische Wellen mit Frequenzen im sichtbaren Spektralbereich bezeichnet. Laserstrahlung befindet sich ebenfalls im sichtbaren Spektralbereich und überdies hinaus auch im angrenzenden Spektralbereich. Die Grundlage für die Lasertechnologie entstammt der Quantenmechanik. Somit ist der Laser als eine Licht- bzw. Strahlungsquelle zu verstehen, die je nach Art des Lasers eine für ihn charakteristische Wellenlänge besitzt. Besonders hervorgehoben sei, dass es sich dabei um eine gebündelte Strahlung handelt.

Ein wesentlicher Unterschied zu anderen Lichtquellen (beispielsweise der einer Glühlampe) ist, dass der Laserstrahl einfarbig im Sinne einer Spektralfarbe ist, man

spricht dann von einer monochromatischen Emission. Laserstrahlung ist überdies auch kohärent, das heißt, dass die Wellen gleicher Frequenz in einer Ebene schwingen (in Phase). Ein weiterer Vorteil der Laserstrahlung ist ihre geringe Divergenz, in anderen Worten besitzt sie eine geringe Strahlenausbreitung von wenigen Zehntel Rad. Dieses Attribut ermöglicht die Zurücklegung einer großen Übertragungsdistanz ohne nennenswerte Strahlenausbreitung und stellt somit eine gezielte Bestrahlung sicher. Abbildung 34 fasst diese drei Vorteile anschaulich zusammen.

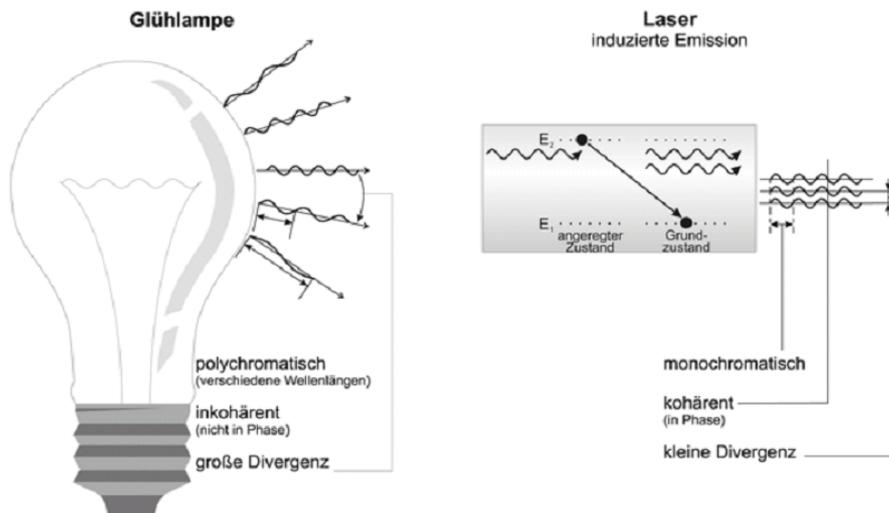


Abbildung 34: Laserstrahl in Relation zu dem Licht einer Glühbirne³⁴

5.1.2 Emissionsentstehung

Bei Licht handelt es sich, wie bereits oben definiert um elektromagnetische Wellen. Diese elektromagnetischen Wellen können von Atomen und Molekülen absorbiert und emittiert werden. Diese Zu- und Abfuhr von Licht geschieht über eine quantisierte Einheit: dem Photon. Es handelt sich dabei um Elementarteilchen, welche wesentliche Bestandteile elektromagnetischer Strahlung sind. Diese Elementarteilchen entstehen bei dem Rückfall von angeregten Elektronen bzw. Atomen, in einen energetisch niedrigeren Zustand. Man spricht dabei von einer Photonenemittierung. In anderen Worten fallen angeregte Atome in einen energetisch niedrigeren Zustand zurück, in dem sie ein Photon aussenden (emittieren). Diese Zustandsänderung kann, wenn sie in einem gewissen elektromagnetischen Emissionsspektrum stattfindet, als Licht wahrgenommen werden. Wesentlich dabei ist, dass diese Emission rein zufällig, also weder zu einem bestimmten Zeitpunkt, noch mit einer bestimmten Orientierung, passiert. In der Praxis werden daher Atomen gewisse Wahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit der Anregungsdauer zugeordnet. Man spricht bei der Dauer von der Erstanregung bis

³⁴ Dilthey, *Schweisstechnische Fertigungsverfahren. 1, 1., 182.*

hin zur Emittierung eines Photons, somit dem Zerfall des Atoms, von der Lebensdauer. Photonen werden somit in der Quantentheorie als Vermittler elektromagnetischer Wechselwirkungen verstanden. Neben der genannten spontanen Emission, gibt es auch eine stimulierte Emission. Dabei wird die Emission eines weiteren Photons durch die Stimulierung eines angeregten Atoms durch ein Photon erreicht. Ein Vorteil dieser Emissionsart ist, dass das Photon dabei das Atom immer in Richtung des stimulierenden Photons verlässt. Somit verdoppelt sich die Anzahl der Photone mit gleicher Orientierung, und man spricht von einer Verstärkung der Emission, vorausgesetzt es sind ausreichend viele Atome in einem angeregten Zustand vorhanden, um diesen Prozess weiterzuführen. Eine Anregung der Atome wird durch die meist intensive Einwirkung von optischer Bestrahlung einer bestimmten Frequenz erreicht, dem „optischen Pumpen“.

5.1.3 Allgemeine Funktionsweise eines Lasers

Der schematische Aufbau eines jeden Lasers setzt sich aus drei Bausteinen zusammen: dem Lasermedium, der Pumpquelle und dem Resonator (Abb.35).

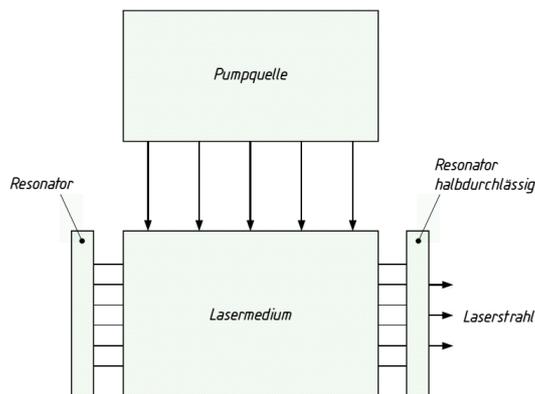


Abbildung 35: Schematischer Aufbau eines Lasers³⁵

Die Pumpquelle erregt das Lasermedium durch Energieeinbringung (elektrische Gasentladung, Blitzlampen) und bringt es so auf ein höheres Energieniveau. Durch das Zurückfallen auf ein niedrigeres Niveau wird Energie in Form eines Lichtquants (Photons) frei. Die Wellenlänge ist

abhängig von der Energiedifferenz zwischen den beiden Anregungszuständen, dem oberem und unterem Laserniveau.

Ein Resonator besteht im Prinzip aus zwei parallel angeordneten Spiegeln, von denen einer halbdurchlässig ist. Zwischen den Spiegeln befindet sich das Lasermaterial, auch laseraktives Medium oder kurz Lasermedium genannt. Bei jedem Durchlauf durch das Lasermedium (Gasmoleküle, Ionen) wird das Licht von den Spiegeln reflektiert und stimuliert dadurch fortlaufend das Lasermedium. Somit wird die stimulierte Emission verstärkt. Durch die Ausrichtung der Spiegel normal auf den Lichtgeschwindigkeitsvektor wird sichergestellt, dass sich alle Lichtwellen parallel zur Achse befinden. Sollten schräg laufende Strahlen entstehen, werden

³⁵ Fahrenwaldt und Schuler, *Praxiswissen Schweißtechnik*, 83.

diese nach einer Reihe von Durchläufen vollständig heraus gespiegelt, und der Laserstrahl kann über den halbdurchlässigen Spiegel ausgekoppelt werden.

Die verschiedenen Arten von Lasern unterscheiden sich durch ihre Lasermedien und Pumpquellen, wie im Folgenden detailliert erklärt wird. Auf Grund ihrer industriellen Relevanz wird vorwiegend auf den CO₂-Laser und den Nd:YAG-Laser (Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser) eingegangen.

Tabelle 5: Laserarten³⁶

Lasertyp	Laseraktives Material	Pumpmechanismus und Pumpquellen	Beispiele
Gaslaser	Gas oder Dampf	Elektrisch angeregte Gasentladung	CO ₂ -Laser: 10,6 µm Eximer-Laser: 175-483 nm
Festkörperlaser	Kristalle oder Gläser, die mit optisch aktiven Ionen dotiert sind	Optisch, mit Anregungslampen oder Diodenlaser	Rubin-Laser: 694 nm, Nd: YAG-Laser: 1,06 µm
Farbstofflaser	Organische Farbstoffe in stark verdünnter Lösung	Optisch, mit Blitzlampen oder Laser	Abstimmbar
Halbleiterlaser	Halbleiter	Elektrisch	GaInP: 670-680 nm GaAlAs: 780-880 nm

Die Leistung eines Lasers wird in Watt bemessen, und beschreibt Energie pro Zeit. Sie beschreibt also die Energie aller Photonen pro Sekunde, die einem gedachten Referenzpunkt passieren. Die Leistungsdichte ist Leistung pro Fläche, sie verändert sich mit dem Strahlquerschnitt. Sie ist also anders als die Leistung nicht konstant. Sie steigt um Zehnerpotenzen mit dem Fokus an. In der Lasertechnik wird mit dem Begriff Energie meist die auf das Werkstück einwirkende Energie bedacht. Man berechnet sie aus dem Produkt der Laserleistung und der Einwirkzeit. Dabei entspricht die Pulsenergie dem Produkt der mittleren Pulsleistung und der Pulsdauer. Als weiteres Kriterium zur Bewertung eines Laserstrahls dient die Leistungsdichteverteilung. Es handelt sich um die Verteilung der Leistungsdichte über den Strahlquerschnitt. Es werden verschiedene charakteristische Leistungsdichteverteilungen unterschieden, die Moden. Die Grundmode und die einfachste Symmetrie bezeichnet man als Gauß-Mode. Hier entspricht die Leistungsdichteverteilung der Gauß'schen Normalverteilung und ist der ideale Strahl im Sinne der Gauß'schen Optik, da die Ausweitung am geringsten und die Strahlqualität so bestmöglich ist. Die Strahlqualität beschreibt das Ausbreitungsverhalten des Laserstrahls, dabei ist sie am höchsten je schmaler der engste Strahlquerschnitt (Strahltaile) und je kleiner der Öffnungswinkel (Divergenzwinkel) ist. Nach der Strahltaile weitet sich der Strahl mit dem Divergenzwinkel auf. Eine hohe Strahlenqualität ist ein Garant für eine bessere Fokussierbarkeit, sie hängt von der Wellenlänge ab und kann nur in der Grundmode

³⁶ Ebd., 84.

erreicht werden. Fragt man Fachleute nach der Strahlqualität wird entweder als Strahlparameterprodukt oder den M^2 -Wert (Beugungsmaßzahl) quantifiziert und ist in der DIN EN ISO 11145 definiert. Das Strahlparameterprodukt (SPP) ist das Produkt des Durchmessers der Strahltaile d_0 und des Öffnungswinkels θ :

$$SPP = \frac{1}{4} * d_0 * \theta$$

Ein kleiner SPP-Wert steht für eine höhere Strahlqualität. Der beste Wert Festkörperlaser liegt bei $0.3 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, wobei ein Millimeter mal einem Millirad einem Winkel von 0.057° bei einem Radius der Strahltaile von einem Millimeter entspricht. Das Beugungsmaßzahl M^2 steht für die Abweichung des Strahlparameterproduktes vom Optimum:

$$M^2 = \frac{1}{2} * d_0 * \frac{\pi}{\lambda} * \theta$$

Die Werte sind immer größer oder gleich 1. Entspricht M^2 einem Wert von 1 so ist der reale Strahl dem Ideal gleich, daher ist ein Wert nahe 1 anzustreben. Der mathematische Zusammenhang dieser zwei Werte sei hier gegeben:

$$M^2 = SPP * \frac{\pi}{\lambda}$$

Laserstrahlen können in verschiedenen Betriebsarten verwendet werden. Dabei werden sie nach ihrem zeitlichen Verhalten klassifiziert. So werden beispielsweise kurze Laserpulse zum Punktschweißen und kontinuierliches Laserstrahlen zum Härten verwendet. Es gibt drei Betriebsarten auf die hier näher eingegangen wird: Dauerstrichbetrieb (cw=continuous-wave), Pulsbetrieb und Pulsbetrieb mit Pulsüberhöhung. Laser im cw-Betrieb können auch im Pulsbetrieb arbeiten, umgekehrt ist dies nicht möglich. Im continuous-wave-Betrieb findet eine kontinuierliche Anregung des aktiven Mediums statt, wodurch eine stetiger Laserstrahl emittiert wird, dabei werden Leistungen von einigen Zehnerpotenzen bis hin zu einigen Kilowatt erreicht. Im Pulsbetrieb findet die Anregung in Pulsen statt und erzeugt so kurze Laserpulse, dabei liegt die maximale Pulsleistung stets unter der Anregungsleistung. Im Pulsbetrieb wird die mittlere Leistung zur Bewertung herangezogen. Sie setzt sich aus der Dauer und Frequenz der Laserpulse zusammen. Auf den Pulsbetrieb spezialisierte Festkörperlaser erreichen Pulsleistungen bis zu 60 kW bei Pulsdauern von einigen Millisekunden.

5.2 Gas-Laser

Laser werden nach dem Aggregatzustand ihres aktiven Mediums unterschieden. Hier soll der bekannteste Vertreter der Gas-Laser vorgestellt werden: der CO_2 -Laser genannt. Er genießt in der Praxis den größten Gebrauch.

5.2.1 CO₂-Laser

CO₂-Laser sind eine feste Größe in der Materialbearbeitung geworden und werden zum Schneiden und Schweißen genutzt. Ihre Wellenlänge liegt im fernen Infrarot und beträgt 10,6 Mikrometer. Ihr Leistungsbereich liegt zwischen 10 Watt bis zu 20 000 Watt, bei hohen Strahlqualitäten von M² von 1,1 bis 5,0. Ihre Betriebsarten sind Dauerstrichbetrieb (cw) oder gepulst. Sie sind ideal für eine gleichmäßige Bearbeitung, da sie eine gleichmäßige Intensitätsverteilung und eine hohe Modestabilität besitzen. Ihr kompakter Aufbau macht eine Integration in bestehende Maschinenkonzepte einfach.

Als Lasermedium dient ein Gasgemisch aus Kohlendioxyd (CO₂), Stickstoff (N₂) und Helium (He) in einem Mischungsverhältnis 1:1:8. N₂ dient dabei als Energiespeicher und Überträger, während He zur Abfuhr der Wärme benötigt wird. Als Anreger wird eine Gasentladung verwendet, womit zunächst den Stickstoffmolekülen Energie zugeführt wird, dadurch werden diese vom Grundzustand in den angeregten Schwingungszustand angehoben. Durch ein Aufeinandertreffen angeregter Stickstoffmoleküle auf CO₂-Moleküle wird ihre Schwingungsenergie auf die CO₂-Moleküle übertragen. Die sich im Grundzustand befindlichen Moleküle werden also so angeregt, dass sie in das obere Laserniveau übergehen, das in diesem Falle dem Pumpniveau entspricht. Die N₂-Moleküle gehen nach Abgabe ihrer Energie wieder in den Grundzustand zurück. Fallen die CO₂-Moleküle vom oberen Laserniveau wieder auf das untere Laserniveau zurück, so wird Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von 10,6 µm emittiert. Die Rückkehr in den Grundzustand erfolgt dann unter Abgabe von Wärme strahlungslos. Die dabei entstehende Wärme muss über ein Kühlsystem abgeleitet werden.

Standardwerte für CO₂-Laser liegen heute bei 2- 20 kW, im Laborbereich bis 40 kW.³⁷

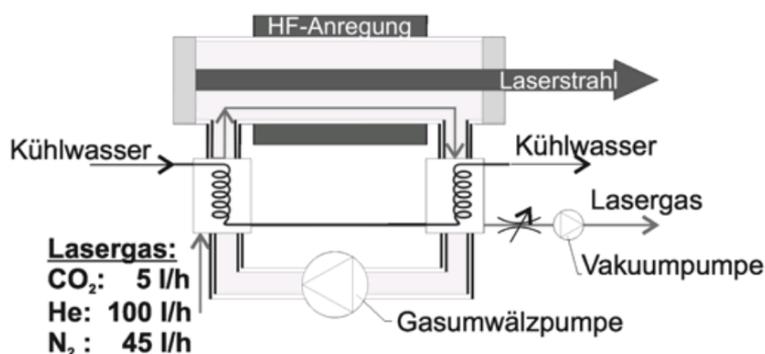


Abbildung 36: Längsströmender CO₂-Laser³⁸

³⁷ „Tiefschweißen - TRUMPF Deutschland“, zugegriffen 17. September 2013, <http://www.de.trumpf.com/produkte/lasertechnik/loesungen/anwendungsfelder/laserschweissen/tiefschweissen.html>.

³⁸ Dilthey, *Schweisstechnische Fertigungsverfahren*. 1, 1., 195.

Der Verlustanteil, welcher in Form von Wärme auftritt, wird über den Resonator abgeführt. Dafür wird beim CO₂-Laser das Gasgemisch ständig über Wärmetauscher umgewälzt. Je nach Art des Gastransports wird zwischen längs- und quergeströmten Lasersystemen unterschieden (Abb.36 und Abb.37).

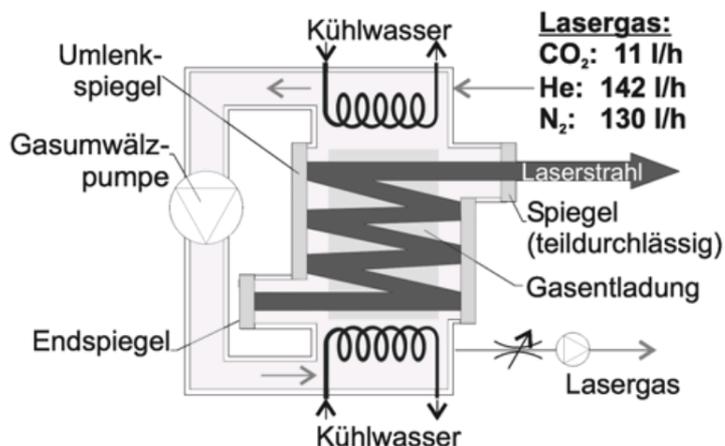


Abbildung 37: Quergeströmter CO₂-Laser³⁹

Quergeströmte Systeme können bei kompakter Bauweise aufgrund der Mehrfachaltung des Strahls höhere Ausgangsleistungen erzielen, haben aber eine schlechtere Strahlqualität als

die längsgeströmten Systeme. Bei einer Gleichstromanregung ist die Elektrode innerhalb der Gasladungskammer installiert, dadurch kommt es zur Wechselwirkung zwischen Elektrodenmaterial und Gasmolekülen, aus der Elektrodeneinbrände entstehen. Daher muss bei einer Gleichstromanregung ein Teil des Gasgemisches regelmäßig ausgetauscht werden.

An dieser Stelle soll kurz eine Reihe an Vorteilen der beiden Gastransportarten aufzählen.

Längsgeströmte CO₂ – Laser:

- kompakte Bauweise möglich (Bsp. Faltung des Resonators)
- bei Hochfrequenzanregung quer zur optischen Achse
- bei Gleichstromanregung parallel zur optischen Achse
- in jedem Fall ist die Gasströmung und die optische Achse parallel zueinander
- stabile Intensitätsverteilung (low-order-mode)
- Laserstrahlleistungen: ≤5kW DC-Anregung
 ≤10kW HF-Anregung

Quergeströmte CO₂-Laser:

- kompakte Bauweise infolge von Mehrfachdurchgängen durch das Gas
- Gleichstromanregung
- Gleichstromanregung, Gasströmung und optische Achse senkrecht zueinander
- örtlich und zeitlich instabile Intensitätsverteilung (multi-mode)

³⁹ Ebd.

- Laserstrahlleistungen: $\leq 25\text{kW}$ DC-Anregung

Von Bedeutung ist, dass die Wellenlänge des Lasers die Fokussierbarkeit des Strahls und die Strahlabsorption beeinflusst. Ungünstig ist dies, weil die Wellenlänge von $10,6\ \mu\text{m}$, wie bei den meisten CO_2 -Lasern verwendet, die Strahlfortleitung mittels Lichtwellenleiter und die Strahlformung durch Glaslinsen nicht erlaubt. Nachteilig ist auch, dass bei dieser Wellenlänge die Energieabsorption bei Metallen, insbesondere bei Stahl und Eisen, einen Minimalwert aufweist. Günstiger ist hier der Nd:YAG-Laser (Abb. 38).

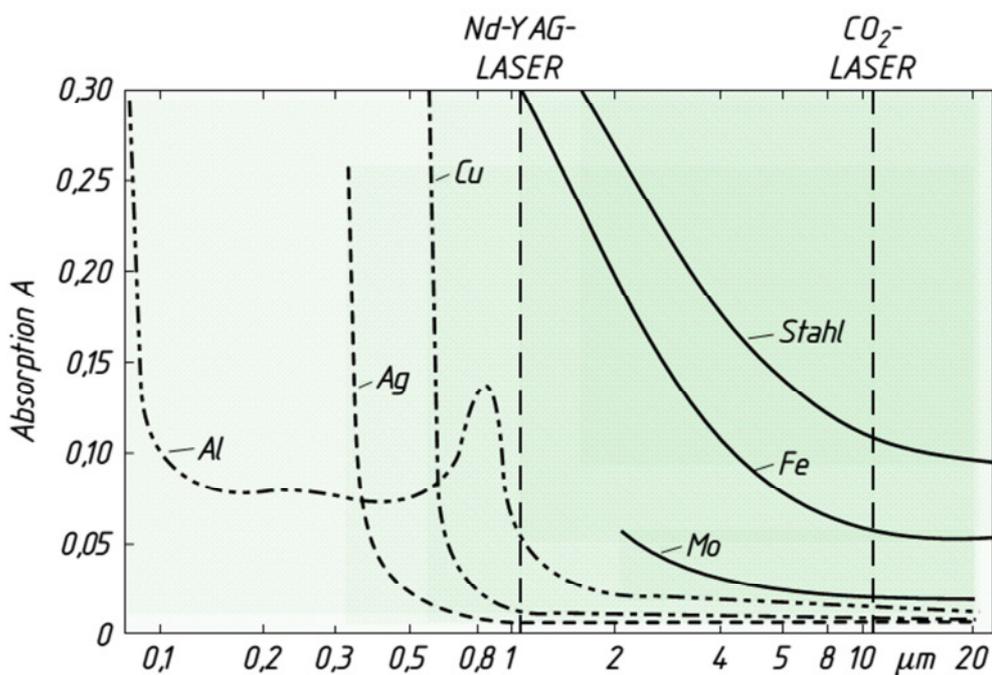


Abbildung 38: Energieabsorption⁴⁰

Wenn die Energiedichte des Laserstrahls über einem kritischen Schwellenwert von etwa $106\ \text{W}/\text{cm}^2$ liegt, so wird der Werkstoff so hoch erhitzt, dass er am Auftreffpunkt des Strahls verdampft, dies ist vor allem bei CO_2 -Lasern erwünscht. Es entsteht dabei ein tief in das Werkstück eindringender Dampfkanal, damit erzielt man den Tiefschweißeffekt, Metaldampf wird infolge der Absorption eines Teils der Strahlenergie ionisiert (Plasma). Besonders von Vorteil ist dies im Falle des CO_2 -Lasers, da das Absorptionsvermögen des Plasmas für die Wellenlänge dieses Lasers höher ist als das der Schmelze. Daher kann die Energie des Laserstrahls mit Unterstützung des Plasmas fast vollständig in das Werkstück eingebracht werden. Somit wird die Absorptionsschwierigkeit des CO_2 -Lasers ausgeglichen. Verwendet werden zum Tiefschweißen CO_2 -Lasern und Nd:YAG-Laser im Dauerstrichbetrieb.

⁴⁰ Grote u. a., *Dubbel*, 225.

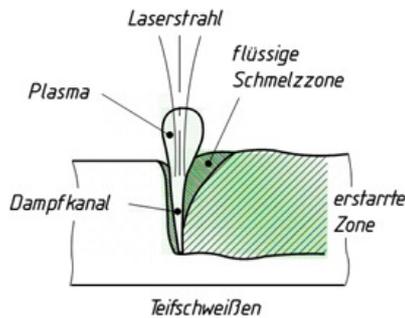


Abbildung 39: Tiefschweißen (Firma Trumpf)⁴¹

Die durch das Tiefschweißen erzeugten Nähte sind schmal, können Tiefen erreichen die dem zehnfachen der Breite entsprechen. Bei Verwendung eines CO₂-Lasers von 12 kW Leistung können in Baustählen bis zu 20mm tiefe Nähte erzeugt werden. Ein weiterer Vorteil des Tiefschweißens ist, dass in der Regel bei sehr kleinen Spaltbreiten auch ohne Schweißzusatz gearbeitet werden kann. Übersteigt die Spaltbreite aber einen Wert von ca. 5 % der Tiefe, so muss mit Zusatz geschweißt werden.

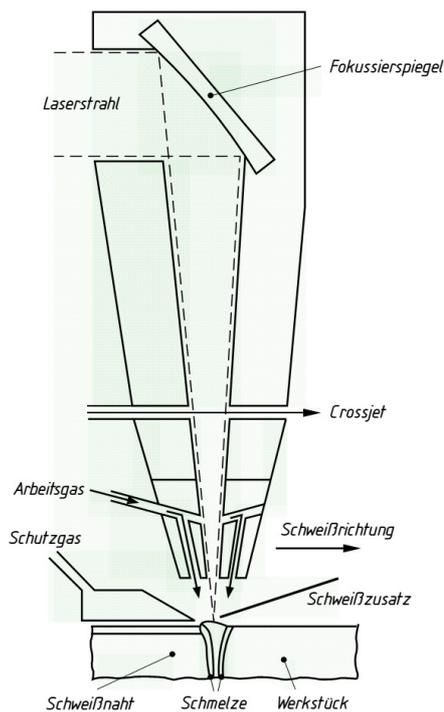


Abbildung 40: CO₂-Laser-Schweißkopf (Firma Trumpf)

Das Schweißen mit dem CO₂-Laser bedarf der Anwendung von Arbeitsgasen. Diese haben die Aufgabe, Dichte und Ausdehnung des sich aus den Metaldämpfen entwickelnden Plasmas so zu beeinflussen, dass dieses sich nicht vom Werkstück ablöst und damit gegen den Laserstrahl abschirmt. Helium wäre für die Aufgabe ideal, wird aber meist aus Kostengründen durch Argon, Stickstoff und Kohlendioxid ersetzt. Zu beachten ist zusätzlich, dass trotz der Arbeitsgase Schutzgase zum Schutz der Schmelze und der Raupe bei der Abkühlung dienen und zum Einsatz kommen. Auch zu diesem Zweck wird bevorzugt Helium verwendet. Je nach zu schweißendem Werkstoff kommen, aber auch andere Gase zum Einsatz.

Es müssen an den zu verschweißenden Grundwerkstoff für das allgemeine Laserschweißen besondere Anforderungen gestellt werden:

- Der Werkstoff sollte so gering wie möglich reflektieren, d. h. das Absorptionsvermögen muss groß sein.

⁴¹ „Tiefschweißen - TRUMPF Deutschland“.

- Bei Stahl darf der C-Gehalt nicht zu hoch sein, da sonst die Gefahr einer Aufhärtung und Versprödung der Naht besteht. Es sollten nur mit Silizium beruhigte Stähle verwendet werden.
- Eine gleichbleibende Qualität der Schweißung kann nur durch eine konstante Qualität des Werkstoffs erzielt werden.
- Eine von Fett und Öl befreite Oberfläche ist unbedingte Voraussetzung für eine gute porenfreie Naht.

5.3 Festkörper-Laser

Festkörper-Laser besitzen eine kurze Grundwellenlänge von etwa 1, sie lässt sich beispielsweise in grün (532 nm) oder ultraviolett (355 nm, 266 nm) verändern. Festkörperlaser existieren in gepulster Version oder cw-Betrieb. Letztere liefern Leistungen von einigen Kilowatt. Pulslaser schaffen Leistungen bis zu einigen 100 kW.

5.3.1 Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser (Nd:YAG)

Ein Nd:YAG-Laser gehört zur Klasse der Festkörper-Laser und besteht aus folgenden Komponenten: Laserstab, Anregungslampen und Spiegeln. Diese drei Komponenten sind in einem Gehäuse mit doppelt-elliptischem Querschnitt angeordnet, das als Kavität bezeichnet wird. Der Laserstab (ein stabförmiger Einkristall von rundem oder rechteckigem Querschnitt) liegt zentrisch in der Kavität. Die Anregungslampen sind seitlich in der durch die Brennpunkte der Ellipsen gebildeten Linie angeordnet und werden gekühlt (Abb.41) Als Lasermedium dient hier das namensgebende Mineral Yttrium-Aluminium-Granat (YAG), in das Neodymatome Nd^{3+} als schwache Dotierung eingebaut sind. Der Nd:YAG-Laser zählt zur Art der Festkörperlaser, welche optisch mit Krypton-Bogenlampen bepumpt werden.

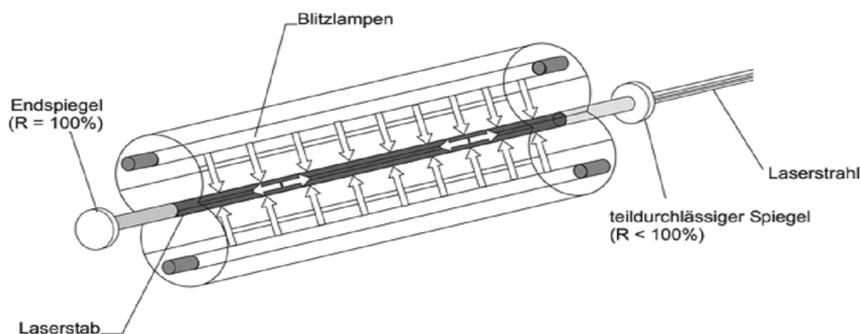
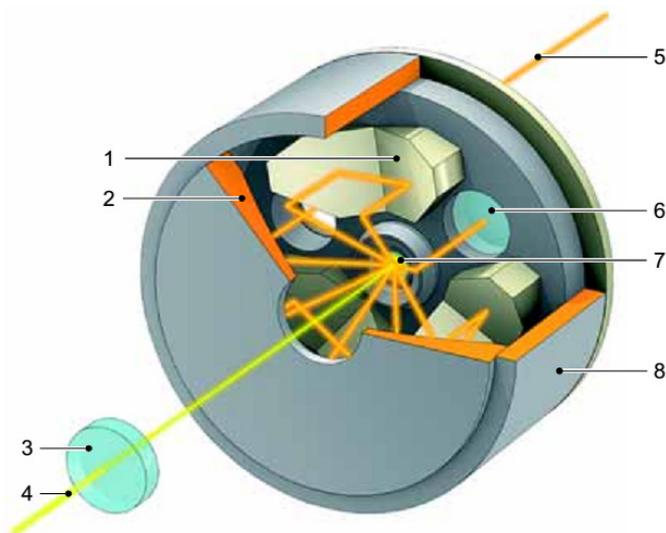


Abbildung 41: Nd:YAG- Laser

Die Leistung eines Lasers ist direkt abhängig von zwei Faktoren: dem Volumen des Laserstabes und der Anregungsleistung. Sie steigt mit der Länge bzw. der Größe des Stabs und der Leuchtleistung der Lampen. So lässt bei einem Laser die

Pulsleistung durch eine Steigerung der Leuchtleistung auf maximale Pulsleistung von über 10 kW und die mittlere Leistung auf über 500 W steigern. Hohe Laserleistungen ziehen aber ein Sinken der Strahlenqualität auf Grund des Effektes der „thermischen Linse“ nach sich. Eine zunehmende Laserleistung erwärmt den Stab, sodass das Kühlwasser nur noch den Außenmantel ausreichend kühlen kann. Die Temperatur ist in der Stabmitte am höchsten und nimmt zum Rand hin ab, dadurch ändert sich der Brechungsindex abhängig vom Radius. Der Laserstrahl weitet sich auf, die Strahlqualität nimmt ab. Um diesen Effekt der thermischen Linse zu vermeiden muss auf andere Formen des aktiven Mediums zurückgegriffen werden. Der Scheibenlaser ist eine solche Form. Er besitzt ein großes Leistungsspektrum bis zu 8 kW, hohe Strahlqualität, einen hohen Wirkungsgrad, und wird daher meist zum Schweißen und Schneiden eingesetzt. Er ist auch für den Einsatz mit einer Scanneroptik (später mehr dazu) geeignet. Als aktives Medium wird eine sehr dünne Nd:-YAG Kristallscheibe ($d=15\text{ mm}$, $b=0.2\text{ mm}$) verwendet. Sie wird auf einer Wärmesenke gelagert, die die Wärme ableitet. Die Rückseite der Kristallscheibe ist verspiegelt, und reflektiert Laserlicht und dient auch als Umlenkspiegel. Der Laserstrahl, welcher in der dünnen Scheibe entsteht, verlässt die Kavität durch eine Bohrung in der Mitte des Parabolspiegels. Der Auskoppelspiegel des Resonators befindet sich außerhalb der Kavität (Abb. 42.). Der lange Resonator hat den Effekt, dass nur die Laserlichtwellen verstärkt werden, deren Ausbreitungsrichtung exakt der Resonatorachse entsprechen. Ein weiterer Vorteil ist das Fehlen der thermischen Linse. Es besteht zwar ein Temperaturunterschied, zwischen der Vorder- und Rückseite der der Scheibe, dieser verläuft jedoch parallel zur Ausbreitungsrichtung des Laserlichts, und wirkt sich daher nicht auf die Strahlausweitung aus.



- | | |
|------------------------------|-----------------------------------|
| 1 Umlenkspiegel | 5 Pumplaserstrahl |
| 2 Parabolspiegel | 6 Rückspiegel |
| 3 Auskoppelspiegel | 7 Kristallscheibe, aktives Medium |
| 4 Ausgekoppelter Laserstrahl | 8 Kavität |

Abbildung 42: Scheibenlaser der Firma Trumpf

5.3.2 Dioden-Laser

Eine neuere Entwicklung verwendet zur Anregung Halbleiterlaser, auch Diodenlaser genannt. Die diodengepumpten Festkörperlaser haben einen hohen Wirkungsgrad und eine lange Lebensdauer.

Eine besondere Form des Festkörperlasers ist der Diodenlaser als Faserlaser. Dabei wird ein dotierter Kern einer Glasfaser als Lasermedium verwendet. Es handelt sich also um einen Glaslaser mit Eigenschaften eines Lichtwellenleiters. Da die Glasfaser als Lasermedium dient ist es klar, dass die Laserintensität mit der Länge der laseraktiven Faser verstärkt wird. Gepumpt wird der Laser mit einer größeren Zahl von Einzeldioden.

Ein Faserlaser besitzt Leistungen zwischen 100 W und etwa 10 kW, Wellenlängen zwischen 1070 und 2000 nm und eine sehr gute Strahlqualität, weshalb er sich besonders zur Feinbearbeitung eignet. Nd:YAG Laser weisen ein günstigeres Absorptionsverhalten auf, überhaupt die Gruppe der Festkörperlaser. Wellenlängen im Bereich von 1,06 μm werden von beispielsweise Stahl besser absorbiert und lassen sich auch effizienter führen. Im Bereich der Festkörperlaser sind heute mittlere Ausgangsleistungen bis zu 6 kW erzielbar, Faserlaser stehen schon mit Leistungen über 10 kW zur Verfügung.

Die Möglichkeit, den Festkörper-Laserstrahl mittlerweile auch im Kilowatt-Bereich über flexible Lichtleiter zu führen, prädestiniert diese Systeme für den Robotereinsatz, wo der CO_2 -Laser nur über komplizierte und verlustreiche Spiegelsysteme eingesetzt werden kann. Einige Lichtleitfasern erlauben bei Faserdurchmessern unter 1 mm Biegeradien bis zu 100 mm. Mit diesem System ist unter einem festen Teilungsverhältnis auch das Schweißen an mehreren Stationen gleichzeitig möglich.

5.4 Laserstrahlführung

Um die Distanz von der Strahlenquelle zum Werkstück zu überbrücken, wird von einem Führungssystem bestehend aus Linsen, Spiegeln und Laserlichtkabel Gebrauch gemacht. Laserlichtkabel werden verwendet, wenn die Strahlquelle nicht unmittelbar mit der Laseranlage verbunden ist. Das ist sehr häufig der Fall. Dafür wird das Laserlicht unter Berücksichtigung eines geeigneten Winkels in den Leiter eingekoppelt und darin geführt. Als Leiter wird eine dünne Faser aus Quarzglas verwendet. Sie leiten das Laserlicht fast verlustfrei über lange Wege mehrere 100 m, beispielsweise von der Strahlquelle zum Roboter. Laserlichtkabel sind biegsam. Ein Laserstrahl kann über mehre Kabel geteilt und zu verschiedenen Arbeitsstationen geführt werden.

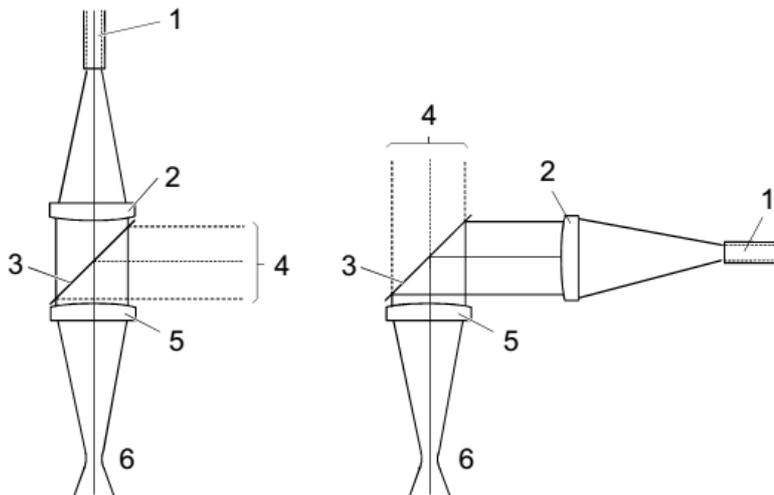
Zur Strahlfokussierung und Strahlführung von Laserstrahlen werden meist Spiegel-Optiken (siehe Abb.43) verwendet. Als Werkstoff dient dabei in der Regel wegen seiner hohen Wärmeleitfähigkeit Kupfer welcher zum Oberflächenschutz oft molybdänbeschichtet, da sich Linsen-Optiken aufgrund von Absorption erwärmen können, insbesondere bei hohen Leistungen. Dieser Effekt wird durch Verschmutzungen verstärkt. Es ist die Gefahr einer Verformung gegeben, da die Wärme lediglich über die Fassung abgeführt werden kann. Daraus resultiert eine Veränderung der Brennweite oder sogar eine Zerstörung durch Überlastung.

Die Absorption der Laserstrahlung ist bekanntlich wellenlängenabhängig. Daher werden die Linsen-Optiken überwiegend bei Nd:YAG, Dioden- und Faserlasern eingesetzt. Der Grund liegt darin, dass ihre Wellenlängen über dem Absorptionsgrad der verwendeten Materialien liegt (anders als beim CO₂-Laser).

Optiken sind vor allem bei kurzen Brennweiten durch Gasströme koaxial oder quer zum Strahl unterhalb der Optik vor Schweißspritzern zu schützen.

Bei Verwendung langer Brennweiten ist im Hinblick auf eine 3-D-Bearbeitung mit hoher Schweißgeschwindigkeit die in Abhängigkeit der Brennweite zunehmende notwendige höhere Verfahrensgeschwindigkeit der Handlungseinrichtung und die dabei zu gewährleistende Bahngenaugigkeit zu berücksichtigen.

Umlenkspiegel kommen immer dann zum Einsatz, wenn ein freier Laserstrahl seine Richtung ändern muss. Sie sitzen an den Ecken der Strahlführung und bestehen für Festkörperlaser meist aus beschichteten Quarzgläsern, welche für die passend für die Wellenlänge beschichtet werden, um eine maximale Reflexion zu erreichen. Umlenkspiegel werden auch als Strahlenweiche verwendet, abhängig von ihrer Stellung lassen sie einen Laserstrahl passieren oder lenken ihn um 90° um. Strahlteiler ermöglichen es einen Laserstrahl von einer Strahlquelle an zwei oder mehrere Arbeitsstationen gleichzeitig zu führen. Sie werden im Lasergerät vor den Steckplätzen der Laserlichtkabel platziert.



- | | | | |
|---|-----------------|---|------------------------------|
| 1 | Laserlichtkabel | 4 | Strahlengang für Beobachtung |
| 2 | Kollimator | 5 | Objektiv |
| 3 | Teilerspiegel | 6 | Fokus |

Abbildung 43: Aufbau einer Fokusieroptik

Um die Objektive bestmöglich zu schützen, wird von einem Gasstrom Gebrauch gemacht, der quer vor dem Objektivschutz verläuft. Abhängig von dem Bearbeitungsprozess führt die Schweißoptik neben diesem Gasstrom (Trumpf: Crossjets) darüber hinaus Schutzgas und Zusatzwerkstoffe an die Bearbeitungsstelle. Sie verfügen in der Standardausführung zusätzlich über Sensoren, die Komponenten und Funktionen der Optik überwachen. Als Beispiel seien Sensoren zur Überwachung des Verschmutzungsgrades des Schutzglases oder des Gasdruck des Crossjets genannt.

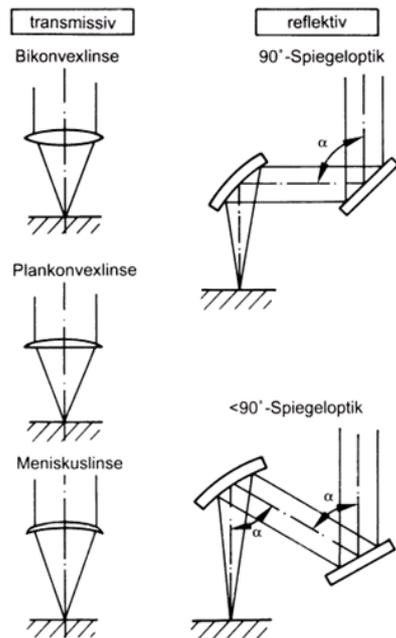


Abbildung 44: Spiegel- und Fokusieroptiken

Der CO_2 -Laserstrahl wird vom Resonator über ein aus Umlenkspiegeln bestehendes Strahlführungssystem zu Bearbeitungsstationen geführt (Abb. 44). Mit Hilfe von Fokussieroptiken (in der Abb. 43) wird der Strahl entsprechend geformt. Die Relativbewegung zwischen Strahl und Werkstück kann auf unterschiedliche Art und Weise realisiert werden:

- bewegtes Werkstück, feste Optik,
- bewegte („fliegende“) Optik,
- Bewegung von Werkstück und Optik (zwei Handhabungsgeräte).

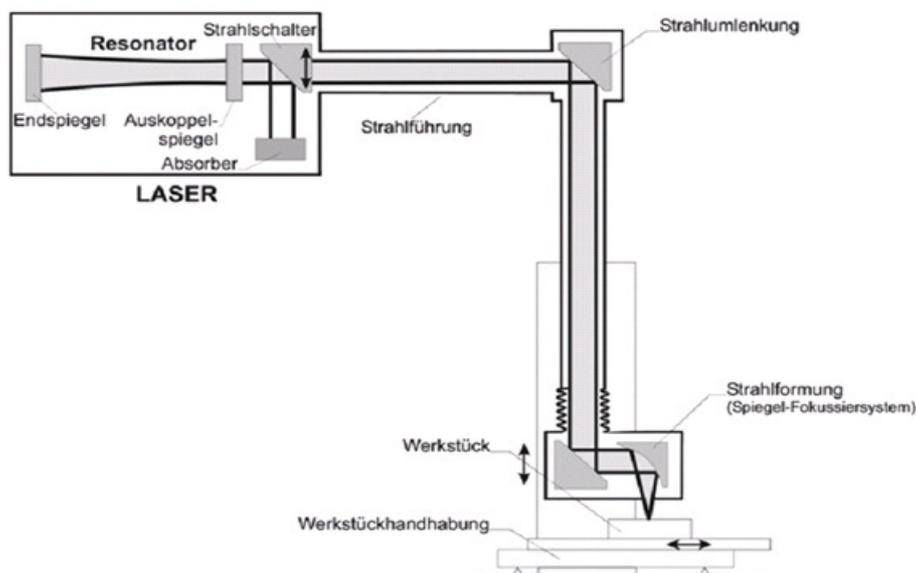


Abbildung 45: Strahlführungssystem

5.4.1 Scannerschweißen (Remote-Laserschweißen)

Ein besonderes Verfahren ist das Remote-Laserschweißen mit der Scanneroptik. Es handelt sich dabei um eine Scannertechnik mit weitem Fokus, wobei der Laserstrahl in einer Ebene hochdynamisch abgelenkt wird. Der Laserstrahlfokus wird mittels eines in zwei Achsen drehbaren Spiegels positioniert. Der Strahl eines CO_2 - oder eines Festkörperlaser wird mit langer Brennweite (bis 1500 mm) fokussiert und über einen um mehrere Achsen schnell beweglichen Umlenkspiegel aus großer Entfernung auf die Bearbeitungsstelle geführt (Abb.46). Dabei bewirken kleine Winkelauslenkungen des Spiegels bereits lange Wege in der Bearbeitungsebene.

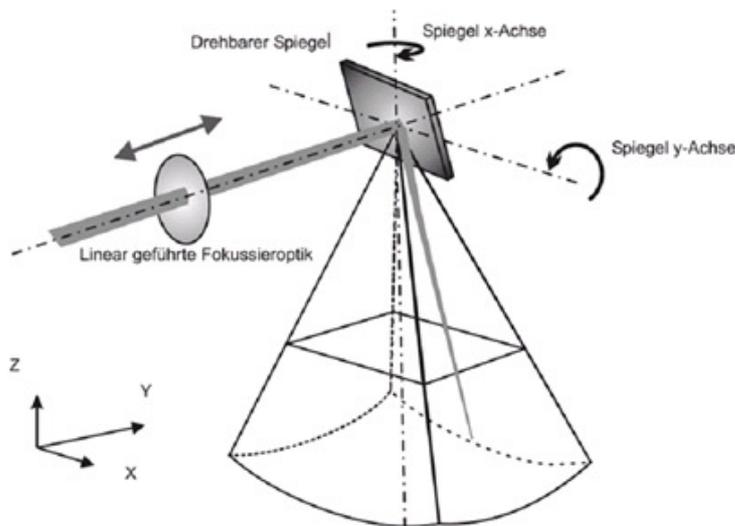


Abbildung 46: Remote-Laserschweißen der Firma Trumpf

Durch eine Verschiebung der Fokussieroptik mit einer weiteren Linearachse kann eine Positionierung des Fokuspunktes im Raum erreicht werden. Zu den Vorteilen des Remote Weldings zählen die überaus kurzen

Amortisationszeiten, die sich aus einer Verringerung der Taktzeiten ergeben. Weitere Vorteile sind die kompakte Bauform und die Erweiterung der Konstruktionsmöglichkeiten, welche durch Erhöhung der Geometrieflexibilität gegeben ist.

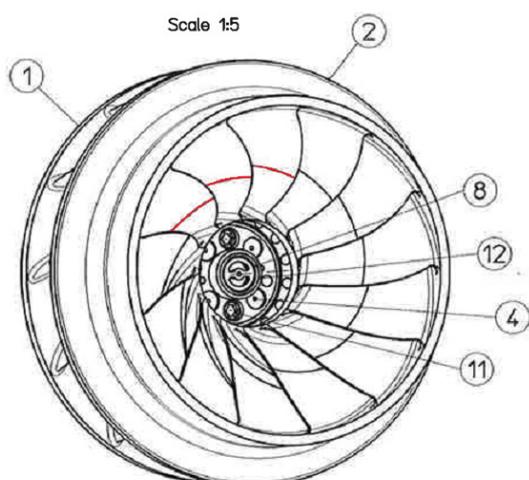
In einem gepulsten Betrieb wird der Laserstrahl schrittweise von einem Schweißpunkt zum anderen bewegt, dabei sind bis zu 300 Schritten pro Sekunde möglich. Im cw-Betrieb wird der Strahl von den Spiegeln kontinuierlich auf einer Bahn in der gewünschten Schweißgeschwindigkeit geführt.

6 Aufgabenstellung des Forschungsprojektes

6.1 Einleitung

Diese Diplomarbeit dient dem Zweck eine auf das Forschungsprojekt zugeschnittene Lösung bzw. einen Lösungsansatz zur Automation des Schweißprozesses zu finden. In diesem Abschnitt seien die Anforderungen an diesen ausführlich erklärt, um eine Bewertung und letztendlich ein Resümee abgeben zu können. Da es sich um ein noch laufendes Forschungsprojekt handelt wird weder der Namen des Unternehmens, noch weitere nicht unbedingt notwendige Information in dieser Diplomarbeit niedergeschrieben. Es ist der verständliche Wunsch des Unternehmens sein technisches Know-How zu schützen um die Wettbewerbsfähigkeit und somit auch die Auftragssicherheit zu gewährleisten. Diesem Wunsch wird in dieser Diplomarbeit bedingungslos Folge geleistet.

Es handelt sich bei dem Werkstück um ein Francis-Laufrad (Abb. 47), deren Maße wie auch Stückzahlen je nach Auftragseingang sehr stark variieren. In der Abbildung wurde der sichtbare Schweißnahtverlauf rot markiert. Dabei verläuft die Schweißnaht in einem spiralförmigen Bogen von der Auslassseite zur breiteren Einlassseite. Der größte Teil der Naht befindet sich daher in einem schwerzugänglichen Bereich zwischen den einzelnen Schaufeln. Dies macht eine automatisierte Lösung sehr schwer, da solche Lösungen in der Fertigung erst ab größeren Stückzahlen und geringeren Variationen meist sinnvoll sind. In diesem Fall liegt die Motivation in der Höhe der Arbeitsstunden des Schweißers und der Fertigungsdauer die ein Francis-Laufrad braucht. Aktuell liegt diese Dauer bei großen Turbinen durchschnittlich bei 2-3 Wochen. Kritisch ist der Arbeitsaufwand für kleinere Modelle, diese brauchen im Durchschnitt 1,5 bis 3 Monaten zur Fertigstellung der Naht. Einer der fertigungstechnischen Limitationen auf die hier eingegangen werden muss ist die



Tatsache, dass diese Laufräder kaum einen Durchmesser größer als 550 bis 12000 Millimeter erreichen. Dieser Umstand verschärft die ohnehin kritische Zugänglichkeit der Schweißnaht, und steigert die Fertigungsdauer. Somit ist klar, dass die aktuelle Fertigungsform, das von Handschweißen, sowohl ein sehr hohes Maß an Erfahrung, als auch ein großes Maß an Fingerfertigkeit bedarf.

Abbildung 47: Francis Laufrad

Durch die geometrische Form des Francis-Laufrades ist die Schweißnaht einer Schaufel für den Schweißer nicht durchgängig ohne sporadische Hilfsmittel (Spiegel) sichtbar.

6.2 Beschreibung des Fertigungsprozesses

Im Anhang A ist das Schweißdatenblatt zu finden, welches die einzelnen Prozessabläufe sowie die Fertigungsbedingungen festlegt, und als Arbeitsanweisung zu verstehen ist. Diese Arbeitsanweisung soll nun in Detail erläutert werden um ein vollständiges Bild von den einzelnen Fertigungsschritten sowie ihre Anforderungen zu verdeutlichen.

Als Schweißprozess wird die Nummer 141 angegeben, dabei handelt es sich um die Referenznummer zur Kennzeichnung der einzelnen Schweißverfahren, welche in der ISO 4063 festgehalten werden. Die vollständige Kennung lautet ISO 4063-141, darunter versteht man den vorgeschriebenen Schweißprozess für das WIG-Schweißen. Die Abkürzung BW beschreibt die durchzuführende Nahtart (siehe Tabelle 1), und steht für eine Stumpfnaht. Die Fugenvorbereitung besteht mit Verweis auf die Zeichnung aus Drehen, Fräsen und Schleifen. Als Laufradwerkstoff wird 1.4313 verwendet. Dabei handelt es sich um eine Werkstoffkennnummer laut DIN EN 10088-2 bzw. 10088-3:2005-9, welche X3CrNiMo13-4 beschreibt. Es handelt sich hier um einen Martensitstahl mit hoher Zähigkeit, der vorwiegend in Pumpen, Reaktoren und Turbinenlaufrädern verwendet wird. Seine Zugfestigkeit liegt im Bereich zwischen 900-1100 N/mm².

Die Schweißpositionen, welche zuvor im Kapitel 2.4. erwähnt wurden, sind hier PA und PB. Diese Kurzbezeichnungen aus der EN ISO 6947:1997-5 beschreiben die Wannensposition (PA) und die Horizontalposition (PB). Es sei hier angemerkt, dass sich die Schweißnaht in einer ununterbrochen spiralförmigen Linie von der Turbinenauslassseite zur Einlassseite entlang der Schaufeln bewegt. Dabei wird aus einer Horizontalposition bei Fortschreitendem Schweißen eine Wannensposition. Bei der Wannensposition liegt die Nahtmitte senkrecht und ihre Decklage (die oberste Lager der Schweißnaht) liegt oben und ermöglicht so ein waagrechtes Arbeiten. Bei der Horizontalposition ist horizontales Arbeiten bei einer oben liegenden Decklage möglich.

Im Zuge der Vorbereitung werden Heftklammern angeschweißt. Das Heftschweißen geschieht in der Schweißnahtfuge. Dabei, ist der Abstand zwischen den einzelnen Heftklammern und Ihrer Länge, abhängig von den zu erwartenden Spannungen im Bauteil. Eine weitere Rolle spielt in diesem Zusammenhang auch die Geometrie des Werkstückes. Das Heftschweißen dient der Fixierung der aneinander anzuschweißenden Bauteile. Wichtig ist dabei, dass auch beim Heftschweißen die Vorwärmtemperatur wie beim Schweißen selbst einzuhalten ist (hier größer gleich

100°C). Im Projektfall sind die Heftklammern zirka 30 mm lang. Bei ihrem Setzen muss eine Schrumpfung in axialer Richtung von zirka 20 mm berücksichtigt werden (Abb.48). Die Wurzelschweißung, damit ist die erste Lage der Schweißnaht gemeint, ist jeweils an zwei sich gegenüberliegenden Schaufeln durchzuführen. Dabei wird die Naht 1a danach 2a (liegt diagonal zu 1a) und in weiterer Folge die beiden Nähte 3a und 4a verschweißt (Anhang A). Erst wenn alle 4 Schaufeln wurzelverschweißt worden sind, erfolgt die Fertigstellung der einzelnen Schaufeln. Dies dient der Verhinderung eines Bauteilverzuges, welcher in nachhinein schwer bis gar nicht zu korrigieren ist. Die zu schweißende Fugentiefe ist nur mit mehreren Lagen zu überbrücken, daher kommt hier das Mehrlagenschweißen zum Einsatz. Jede Lage wird vor dem Auftragen der nächsten auf mögliche Fehler (Risse, Einschlüsse, etc.) überprüft.



Abbildung 48: Beispiel einer Heftschweißung

Die Wurzelnaht ist besonders eingehend zu prüfen, dabei wird die Magnetenpulverprüfung verwendet. Sie wird auch Magnetpulverrissprüfung oder Fluxprüfung genannt. Sie liefert den Nachweis ob Risse nahe der Oberfläche, oder in ihr vorhanden sind. Das Werkstück wird soweit es seine Größe zulässt vollständig oder nur im Bereich der Schweißnaht magnetisiert. Dadurch richten sich Feldlinien innerhalb des Werkstückes parallel zu Oberfläche aus. Liegen Risse und Oberflächenfehler nun quer zu den Feldlinien, so

ergibt sich ein magnetisches Streufeld und es bilden sich an diesen Stellen magnetische Pole aus. Streut man nun das Eisenpulver über die Naht, so sammelt es sich genau über diesen Fehlstellen an. Diese Art der Prüfung besitzt den Nachteil, dass sie keine Fehler und Risse erkennt die parallel zu den Feldlinien verlaufen (siehe Abb.49) und daher bei der Prüfung der Wurzellage nur in Kombination mit

anderen Prüfungsverfahren zum Einsatz kommt.

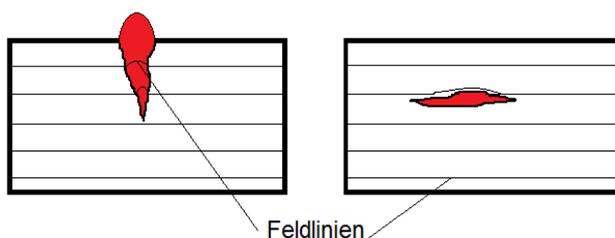


Abbildung 49: Magnetpulverprüfung

Jede Schweißlage wird vor und nach der Wärmebehandlung (Spannungsarmglühen) und zusätzlich mit Ultraschall geprüft. Diese Prüfungsmethode erfasst sowohl zur Oberfläche senkrechte als auch parallele Fehlerstellen.

Laut der Arbeitsanweisung wird die erste und zweite Schweißlage mit dem WIG Schweißverfahren erstellt. Dabei wird eine Stromstärke von 120-180 Ampere und

eine Spannung von 24-28 Volt bei Gleichstrom verwendet. Als Schweißzusatz dient hier Böhler W13-4 IG Draht mit einem Durchmesser von 2,4 mm, welcher bei einer Gesamtwärmeeinbringung von zirka 60 Kilojoule pro Zentimeter in das Schweißbad übergeht. Die dritte und vierte Lage wird, mit Ausnahme der Stromstärke (hier 120-200 Ampere) unter denselben Bedingungen erzeugt. Ab der fünften Lage wechselt man auf Grund des breiteren Fugenabstandes zum MAG-Verfahren (134). Dabei verwendet man eine Drahtelektrode mit einem Durchmesser von 1,2 mm bei einer Spannung von 30 Volt und einer Stromstärke von 230 Ampere, welche eine ungefähre Wärmeeinbringung von 12 Kilojoule pro Zentimeter ermöglichen. Wichtig ist stets auf die Trockenheit der Elektroden und der Fülldrähte zu achten, um Gaseinschlüsse und wasserstoffinduzierte Risse zu vermeiden. Daher wurde im Fertigungsprozess eine Sondervorschrift festgehalten. Diese besagt, dass die Elektroden vor der Benutzung 3 Stunden auf 300°C zu erwärmt werden muss. Die Fülldrähte müssen gut verpackt werden und bei einer bereits angefangenen Drahtrolle, muss ihrer Verpackung Trocknungsmittel beigelegt werden. Zusätzlich zu der Beigabe von Trockenmitteln werden diese Drähte Vakuum verpackt und wird ihre Verpackung zu geschweißt.

Als Schutzgas wird bei den Fertigungsschritten mit dem WIG-Verfahren inertes Schweißargon verwendet (4.6 l/min nach EN 439). Als Durchflussmenge wird ein Richtwert von 8-10 Liter pro Minute verwendet, welcher weder unterschritten (ausreichende Schutzatmosphäre) noch überschritten werden darf (erhöhte Wirbelbildung). Für das MAG-Verfahren kommt ein aktives Mischgas M12 zum Einsatz. Wie bereits im Kapitel 4.1.2.1 beschrieben handelt es sich dabei um ein Mischgas der Gruppe M1, welche einen Kohlendioxidgehalt zwischen 0 und 5 Prozent aufweist. M12 ist eine Unterkategorie der Gruppe M1 und besitzt keinen Sauerstoff in seiner Zusammensetzung. Als Minimum der Durchflussmenge wurden hier 12 Liter und als Maximum 14 Liter pro Minute festgelegt. Zur Sicherung des Schweißbades in beiden Verfahrensarten ist die Vermeidung von Zugluft ausreichend.

Vor dem Schweißen ist das Werkstück auf eine Temperatur zwischen 100°C und 140°C zu bringen um Spannungen zwischen den einzelnen Schweißbereichen zu vermeiden. Nach jeder erstellten Lage ist eine Nachbehandlung durch Spannungsarmglühen (Stahlherstellerempfehlung) durchzuführen, um Verzug zu vermeiden.

Während dem Schweißen, sollte der Abstand des Kontaktrohres bei zirka 20 Millimetern, und der Brennerausstellwinkel bei 80° gehalten werden. Letzteres ist auf Grund der Werkstückgeometrie nicht immer möglich.

6.3 Praktische Fertigung

In diesem Kapitel werden Informationen und Randbedingungen festgehalten, die nur durch die Beobachtung und ein persönliches Gespräch mit dem Schweißer erschlossen werden konnten. Wie sich in weiterer Folge zeigen wird, ist es ein schmaler Grad zwischen der Durchführbarkeit einer Schweißung und ihrem Scheitern, der sehr stark von der Handfertigkeit und Erfahrung des Schweißers abhängt.

Das größte Problem für den Schweißer besteht in der Erreichbarkeit der Schweißnaht. Große Turbinen (Durchmesser ab 1800mm) sind auch mit dem verhältnismäßig größeren MAG-Kopf gut zu schweißen. Die ersten 5 Lagen werden mit dem WIG-Verfahren erstellt und die restlichen mit dem MAG-Verfahren aufgefüllt. Problematisch sind kleiner Turbinen, dabei sind Durchmesser von 500mm keine Seltenheit. In solchen Fällen muss in einzelnen Punkten von der Arbeitsanweisung abgewichen werden. So wird beispielsweise bei schlechter Erreichbarkeit ein WIG-Glasschweißkopf eingesetzt. Er kommt auf Grund seiner Größe zum Einsatz, da kein anderer WIG-Schweißkopf so klein ist. Nachteilig ist aber, dass solche Schweißköpfe für Spannungen von 120 Volt ausgelegt worden sind. Tatsächlich werden diese aber bei einer Spannung von 180-200 Volt betrieben um die notwendige Leistung zu erbringen. Diese hohe Spannung führt zu einem großen Elektrodenverschleiß und zu erhöhten Kosten in der Fertigung. Der Spannungsbereich liegt außerdem unter dem in der Arbeitsanweisung festgehaltenen Idealwert von 230 V.

In jedem Fall werden die beiden aufeinander gesetzten Laufradhälften durch einen Propanbrenner auf zirka 80°C erwärmt. Beruhend auf Erfahrung handelt es sich hierbei laut dem Schweißer um die ideale Vorwärmtemperatur. Da das Erstellen der Schweißnahtabschnitte sehr zeitaufwendig ist muss das Werkstück zwischen durch mit einem Propanbrenner erhitzt werden, um eine ungefähre Temperatur von 60-80°C zu halten. Es ist verständlich, dass es sich dabei für den Schweißer um einen häufigen Werkzeugwechsel handelt, welcher Zeit in Anspruch nimmt.

6.4 Schwachstellenermittlung

Der wesentliche kritische Punkt in der Fertigung ist die Größe der Laufräder und die damit einhergehende Erreichbarkeit der Schweißnaht. Wie bereits im den ersten beiden Kapiteln erläutert wurde, ist die Schweißbarkeit eines Werkstückes stark von seiner Konstruktion und deren Schweißfreundlichkeit abhängig. In diesem Fall ist der Fugenverlauf teils nicht ohne kreative Hilfsmittel einsichtig. So ist der Schweißer gezwungen einen Spiegel mit angebrachten Magneten vor dem Schweißen zwischen den Laufrädern zu positionieren um überhaupt den Fugenverlauf sehen zu können. Man kann in diesem Fall vom Blindschweißen bzw. Schweißen nach Gefühl

sprechen. Der immer lauter werdende Schrei nach höheren Wirkungsgraden ist tonangebend bei der Konstruktion und Auslegung der Francis-Turbinen. Es ist daher ein starker Trend nach dichteren und stärker geschwungenen Schaufeln absehbar. Dies stellt eine nahezu unüberwindbare Herausforderung an die Fertigung dieser Laufräder dar, sowie es auch hier der Fall ist. Die Konstruktion der Laufräder ist im Zuge der Prozessoptimierung von der Fertigung fast gänzlich abgekoppelt worden. Im Idealfall sollten diese Bereiche in stetiger Rücksichtnahme auf einander entwickelt werden. Da es sich aber zu einem großen Teil um Reparatur und Auftragsfertigung handelt sind die Auswirkungen der Konstruktion auf die Fertigungszeit unverhältnismäßig stark und nachteilig.

Die Auftragsfertigung macht eine Anpassung der Fertigung schwierig und bedarf in jedem Fall stets einer auf den Auftrag abgestimmten Fertigung.

7 Automatisierung

7.1 Einleitung

Die Beweggründe, welche in den letzten Jahrzehnten die Industrie zu einem stetigen Wandel in Richtung Automatisierung bewogen haben sind allbekannt. In einigen Industriezweigen sind diese aber stärker als in anderen. So gibt es beispielsweise Länder, in denen die Lohnkosten in keinem Verhältnis zu den anfallenden Investitionskosten stehen und dort daher auf eine Automatisierung verzichtet wird. In Europa wiederum sind Lohnkosten ein entscheidendes Kriterium. Es sind aber nicht nur die wachsenden Anteile der Lohnkosten an den gesamten Produktionskosten die eine Motivation liefern. Es ist auch die Verfügbarkeit von erfahrenen Schweißern. In den letzten Jahrzehnten hat sich ein abnehmender Trend bei Schweißlehrlingen abgezeichnet. Es ist auch die stetig steigende Anforderung an die Qualität, die die Industrie in Richtung eines höheren Mechanisierungsgrades drängt. Durch das Loslösen von menschlicher Kraft in der Produktion kann eine stets gleichbleibende Qualität garantiert werden. Andererseits sind Roboter nur bedingt in der Lage auf wechselnde Anforderungen ihres Umfeldes selbständig zu reagieren bzw. zu agieren. Vollmechanisierte oder automatisierte Systeme sind also nur dann sinnvoll wenn es sich dabei um eine Massen- oder Serienproduktion handelt. In beiden Fällen kann gewährleistet werden, dass sich die Produktionsbedingungen nicht oder nur unwesentlich verändern. Hierbei würden sich dann auch die notwendigen höheren Investitionen lohnen.

Es seien nun einige Aspekte aufgezählt die für eine Automatisierung sprechen:

- der Mangel an qualifizierten Handschweißer
- die Abhängigkeit vom Schweißer (Konzentration, Ermüdung, Arbeitsmoral, hohe Prüf- und Nacharbeitskosten)
- Termintreue (Krankheitsausfällen, Fehlern und Reparaturen)
- hoher Lohnkostenanteil
- die vermehrte Gefahr von Fehlstellen (Ansatzstellen und Endkrater)

Die zuvor genannten Punkte machen die klaren Vorteile der Automation für die Schweißtechnik sichtbar. Daher wird ihr in der DIN 1910 Teil 1 ein eigenes Kapitel zu Unterscheidung in vier Mechanisierungsgrade gewidmet. Es wird dabei nach der Art der Zusatzwerkstoffzufuhr, der Brennerführung sowie des Werkstückwechsels unterschieden.

Allein die technische Möglichkeit zur Mechanisierung eines Schweißprozess ist nicht ausschlaggebend, vielmehr wird auf Basis der Wirtschaftlichkeit entschieden. Hierfür müssen die notwendigen, teils erheblichen Aufwendungen stets in einem adäquaten

Verhältnis zum möglichen technischen und wirtschaftlichen Nutzen stehen. Je nach Verbindungsaufgabe, Losgröße und Qualitätsanforderungen ist ein aus technischer und wirtschaftlicher Sicht vertretbarer Kompromiss zu finden.

Es seien nun kurz wesentliche Aspekte aufgezählt die gegen einen höheren Mechanisierungsgrad sprechen:

- kurze Nähte, häufig in wechselnden Schweißpositionen,
- ungenaue Schweißnahtvorbereitung und Positionierung
- beschränkte Zugänglichkeit der Schweißstelle
- zurückhaltende Investitionsbereitschaft auf Grund von Unsicherheiten
- hohe Investitionskosten
- fehlende oder mangelhafte Anpassungsfähigkeit

7.2 Automatisierung in der Schweißtechnik

In diesem Kapitel soll ein aktuell vom Schweißverfahren unabhängiger Überblick über die für eine Automation notwendigen Bestandteile gegeben werden.

7.2.1 Spannvorrichtungen

Spannvorrichtungen haben den Zweck die genaue Positionierung der zuzufügenden Teile während des Schweißens zu gewährleisten. Dazu wird das Werkstück in eine passende Vorrichtung eingespannt. Je nach Wahl der Spannvorrichtung handelt es sich um eine starre Spannvorrichtung oder um eine mit beweglicher Positioniereinheit. Jede Spannvorrichtung wird unter Berücksichtigung des Werkstückes und des gewählten Schweißprozesses stets eigens für jede Schweißaufgabe konzipiert. So ist es beim Lichtbogenschweißverfahren beispielsweise von Vorteil die Spannvorrichtung so zu wählen, dass eine Wannenlage oder eine horizontale Position möglich ist. Anzustreben sind diese Positionen da sie die Schmelzbadbeherrschung erleichtern und eine gute Nahtausbildung bei gleichzeitig hoher Abschmelzleistung ermöglichen. Am häufigsten finden Dreh- und Drehkipptische ihre Anwendung als Spannvorrichtung. Durch ein zusätzlich bewegliche Einheit (den Positioniersystem) ist eine Bewegung des eingespannten Werkstückes via Hand möglich. Eingespannt wird dabei mit Hilfe von Bolzen. Es gibt unterschiedliche Ausführungen von Drehkipptischen wie zum Beispiel hydraulische Drehkipptisch mit Spannnuten auf der Drehscheibe. An solchen Modellen können Schweißteile mit einem Gewicht von 5 Tonnen ohne weiteres gespannt und bewegt werden. Drehkipptische bieten eine Vielzahl an Positionierungsmöglichkeiten.

Das automatische Schweißen in einer Schweißzelle mit mechanisiertem Werkstückwechsel stellt dem höchsten Mechanisierungsgrad da. Die darin verwendeten Schweißroboter passen sich den individuellen Anforderungen ihrer Umgebung und im speziellen an die Spannvorrichtung an. Es gibt simple Spannvorrichtungen die nur aus einem Rundschaltisch bestehen auf dem das Werkstück von Hand in Position eingespannt wird. Dann gibt es jene die in der Lage sein müssen einen automatischen Werkstückwechsel zu unterstützen. Wird eine automatische Bauteilpositionierung verlangt, so muss ein Drehtisch oder Drehkipptisch zusätzlich auf einen Rundschaltisch montiert werden. Der Antrieb erfolgt um eine hohe Positioniergenauigkeit zu erreichen meist mit servogeregelten Antrieben die direkt über die Robotersteuerung angesteuert werden. Um eine exakte Positionierung zu gewährleisten ist eine Lagebestimmung der Zusatzachsen über absolute oder relative Wegmeßsysteme unerlässlich. Als günstig haben sich für den Robotereinsatz Orbitaldrehkipptische (Abb.50) erwiesen. Orbital bedeutet, dass ihr Drehachse durch das Werkstück führt, und somit das Werkstück während einer Drehung auf nahezu konstanter Höhe gehalten werden kann.

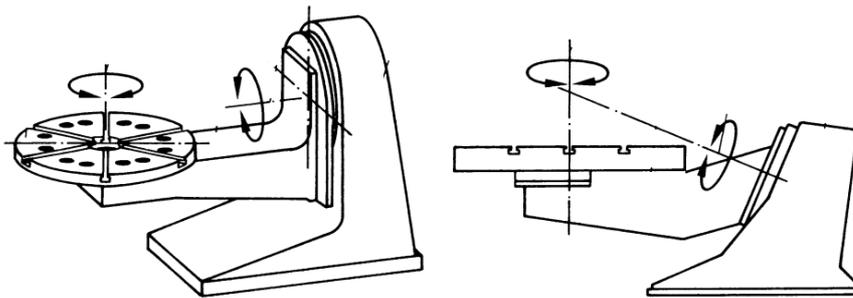


Abbildung 50: Einständer-Drehkipptisch und ein Orbital-Drehkipptisch⁴²

Um eine Konstanzhaltung der Schweißgeschwindigkeit zu gewährleisten muss die Dreh- bzw. Kippachse der Spannvorrichtung mit dem Schweißroboter synchronisiert werden. Es stellt sich durch die zusätzlichen zwei Achsen, die neben den sechs internen Roboterachsen bahn- und zeitsynchron angesteuert werden ein immenser Rechenaufwand ein. Trotzdem ist der Vorteil einer konstanten Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug (Schweißbrenner) und Werkstück diesen Aufwand wert.

Sollte das Werkstück so groß sein, dass es bei einer Drehung oder Bewegung im Zuge der Positionierung den Arbeitsbereich des Roboters verlässt, dann wird von Robotern auf Linearfahrwerken gebraucht gemacht.

7.2.2 Roboter

Industrielle Roboter wurden durch die höheren Ansprüche an die Qualität und Produktivität eingeführt. Dabei ist ein Industrieroboter für das Schutzgasschweißen

⁴² Grote et al., *Dubbel*, 119.

ein universeller Bewegungsautomat mit mehr als 3 Achsen. Diese Achsen sind frei programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt. Solche Roboter sind mit einem Schweißbrenner ausgerüstet und führen die Schweißaufgaben automatisch durch.

Häufig kommen Industrieroboter in der Schutzgasschweißtechnik im Zellaufbau vor. Kern einer solchen Schweißzelle ist ein oder mehrere Bahnschweißroboter in Knickbauweise. Bahnschweißroboter sind Roboter mit in der Knickbauweise die über ein Linearfuhrwerk geführt werden. Sie können sich dabei, auf dem Fuhrwerk sitzend, bewegen oder von diesem vertikal herunterhängend geführt werden (Abb. 51). Der Vorteil einer Überkopf-Montage der Roboter, ist ihre Arbeitsbereicherweiterung.

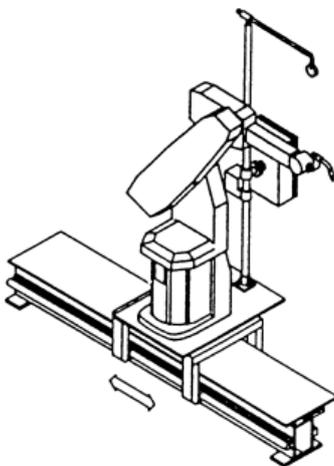


Abbildung 51: Bahnschweißroboter in der Knickbauweise

Um die Erreichbarkeit aller Nähte sicherstellen zu können werden Werkstückpositionierer eingesetzt, wie sie bereits zuvor im Zuge der Spannvorrichtungen erklärt wurden. Sie dienen dabei als externe Achse und werden über die Robotersteuerung gesteuert. Diese Form garantiert eine geringere Taktzeit und kann über einen voll automatischen Werkstückwechsel verbessert werden. Neben den Roboter eigenen Achsen

existieren also auch externe Achsen. Jede einzelne Achse (extern, intern) wird über einen eigenen Antrieb getrieben. Um sowohl schnelle als auch langsame Bewegungen genau durchzuführen, kommen häufig servogeregelte Getriebemotoren zum Einsatz. Dabei wird die Lage und Geschwindigkeitsregelung über inkrementellen Weg- oder Winkelmeßsysteme durchgeführt. Die Positionierung wird über Wegmesser als Ist-Wert-Erfassung und von der Robotersteuerung an den Soll-Wert geregelt. Bei einem zu hohen bzw. niedrigen Ist-Wert wird der Motorenstrom entsprechend korrigiert, so ist eine Genauigkeit von wenigen zehntel Millimetern möglich.

Schweißzellen vereinfachen auf Grund ihrer Konstruktionsmöglichkeiten die Aufrechterhaltung der Schutzgasatmosphäre, besonders wenn es sich um geschlossene Zellen handelt. Sie können vollständig geschlossen sein oder freistehend an der Produktionslinie stehen. In beiden Fällen ist stets auf die Sicherheit der Mitarbeiter zu achten. Zu diesem Zweck werden Schutzzäune, Lichtschranken oder Trittmatten in der Schweißzelle eingesetzt. Die Motoren sind mit Bremsen versehen die bei Durchbrechen der Lichtschranke oder einer anderen Sicherheitsvorrichtung vollständig blockieren. In solchen Fällen schaltet die gesamte Schweißzelle ab.

7.2.3 Steuerung von Robotern

Das Herzstück eines Robotersystems ist die Robotersteuerung. Sie liefert und verarbeitet die notwendigen Informationen und ist Schnittstelle zwischen der Robotermechanik, dem Positionierer, der Schweißanlage, den Sicherheitseinrichtungen und den externen Sensoren. Sie koordiniert sowohl die Signale zur Ansteuerung der Roboter- und Positionierermechanik als auch der Schweißstromquelle. Über einen Host- oder Leitreechner wird eine Kommunikation mit externen Systemen ermöglicht.

Die Steuerung von Industrierobotern funktioniert als Multi-Prozessorsteuerung. Grund dafür ist die Vielzahl an synchron laufenden Berechnungen und Steueraufgaben (Abb.52). Die einzelne Einteilung geschieht in Mikroprozessor-Einheiten, die der Erfüllung einer einzelnen Aufgabe zugeordnet sind. Jede dieser Baugruppen wird über den Systembus mit dem Führungsrechner verbunden. Solche Baugruppen sitzen meist auf eigenen Platinen. Als Beispiel seien unter anderem die Achsrechner, die für die Berechnung der Bewegung und die Ansteuerung der Leistungsteile für die einzelnen Achsen, genannt. Es gibt aber auch eine eigene Baugruppe, die die Ansteuerung des Bildschirms übernimmt. Somit ist klar, dass jede Steuerung einzeln mit einem Mikroprozessor ausgestattet ist und über den Systembus mit der Gesamtsteuerung koordiniert wird.

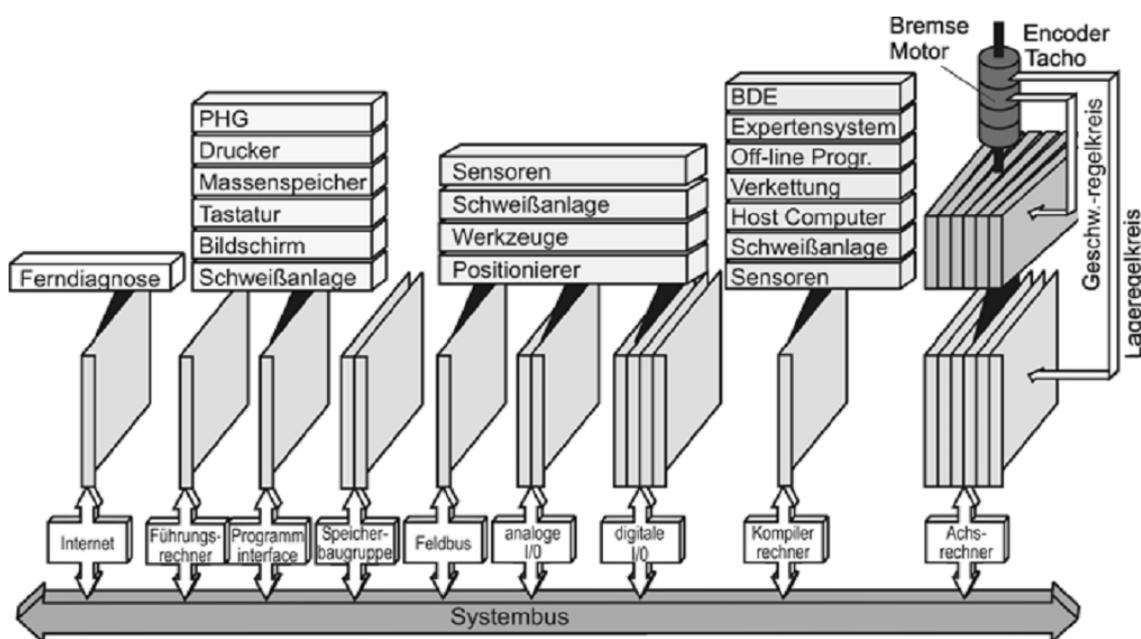


Abbildung 52: Struktur einer Robotersteuerung⁴³

Um eine Reduktion der Stillstandzeiten im Falle einer Störung zu erreichen bieten viele Hersteller eine Robotersteuerung via Internet mit Ferndiagnosesysteme an.

⁴³ Fahrenwaldt and Schuler, *Praxiswissen Schweißtechnik*, 292.

Service Mitarbeiter können so Mitarbeiter vor Ort mit Lösungsansätzen und Analysen unterstützen.

7.2.4 Programmierverfahren

Es gibt grundsätzlich zwei Arten einen Roboter zu programmieren: Online oder Offline. In der Online Methode wird direkt am Roboter programmiert. Beim Offline-Programmierverfahren findet die Programmierung außerhalb der Roboterzelle (Bsp. an einem Rechner) statt.

Zu den Online-Programmierverfahren gehört die Play-Back-Programmierung, in der manuell eine Bahn abgefahren wird. Der Bahnverlauf wird aufgezeichnet und in ein entsprechendes Robotersteuerungsprogramm umgewandelt.

Die am weitesten verbreitete Online Methode ist das Teach-in-Verfahren. Dabei werden markante Punkte an dem zuzufügenden Bauteil angefahren und mit einer individuellen Position und Orientierung gespeichert. So wird beispielsweise eine Bahn von A nach B geschweißt. Es müssen bei dieser Methode zusätzliche Bahnparameter, wie Geschwindigkeit, Verfahrensart oder Schweißparametersätze eingegeben werden. Es wird deutlich, dass dieses Verfahren für komplexere Strukturen ungeeignet ist, da der Aufwand unverhältnismäßig zur Komplexität steigt.

Es bestehen auch Mischverfahren zwischen On- und Offline-Verfahren. Ein Beispiel dafür ist die textuelle Programmierung mit Teach-In-Verfahren von Ablaufprogrammen. Dabei wird ein Ablaufprogramm als Textdatei von einem externen Rechner in die Robotersteuerung übertragen, wo dann die Lagepunkte im Teach-In-Verfahren erfasst werden.

Zu den Misch-Verfahren gehört auch die Makro-Programmierung. Sie dient der Verkürzung der Programmierzeit am Roboter, da Programmbausteine an einem externen Rechner erstellt und dann an der Maschine eingelesen werden können. Makros sind strukturierte Bearbeitungssequenzen. Sie werden zur Erfüllung einer Aufgabe einmal Online gestellt und für weitere gleichartige Aufgaben wiederholt bzw. leicht abgeändert. Diese Form erspart Zeit, wenn die Arbeitsaufgaben nicht allzu sehr variieren. So kann beispielsweise bei dem Schweißen einer I-Naht ein bereits vorhandenes Makro verwendet werden bei dem man nur die Geometriedaten des Werkstückes bzw. Schweißparameter ändert. Es gibt verschiedene Arten von Makros. Geometrie-Makros, sie enthalten die Information zur Brennerführung zur Erstellung bestimmter Nähte oder Nahtabschnitte. Schweißmakros sind die schweißtechnischen Technologieparameter für eine bestimmte Schweißsituation. In ihnen wird die Brenneranstellung und -neigung, sowie weitere Schweißparameter zusammengefasst.

Makros haben den Vorteil, dass die Offline-Programmierung die Stillstandzeiten des Roboters verkürzt und somit zur Kostenreduktion beiträgt.

Zu den Offline-Programmierungsmethoden gehört das textuelle Programmieren. Dabei werden Raumpunktkoordinaten und Brennerorientierungen in einer herstellerspezifischen Programmiersprache an einem externen Rechner eingegeben und anschließend Online gestellt.

Die häufigste Offline-Methode ist die grafische Programmierung. Sie nutzt CAD-Daten, und ist in der Lage grafische Simulationen des Bewegungsablaufs durchzuführen. So kann vorab kontrolliert werden, ob es zu einer Kollision zwischen Werkstück und Brenner kommt. Je nach Schweißzelle müssen die Daten noch in die Steuerung transformiert und dort anschließend auf spezifische Maschinenparameter kalibriert werden. Dies dient dem Abgleich des virtuellen Schweißzellen-Modells mit dem realen Modell.

7.2.5 Programmierfunktionen

Programmierfunktionen sind Funktionen zur Bewegungssteuerung und zur Beeinflussung des Programmablaufes. Es gibt beispielsweise die Point-To-Point-Bewegung (PTP), die dem Anfahren eines beliebigen Raumpunktes mit dem Roboterarm dient. Dabei wird jede Achse einzeln angesteuert, so dass sie gleichzeitig in der Solllage ankommen. Die Kinematik des Roboters ist von der aktuellen Achsstellung dabei stets abhängig, man spricht von einer relativen Kinematik.

Zu berücksichtigen ist, dass eine Gerade zum Beispiel zum Anfahren des Nahtanfanges oder zum Schweißen, stets über Linearinterpolation (CP-Verfahren, continuous Path) angenähert wird. Kreise und Teilkreise werden mit Hilfe von Kreisinterpolationsprogrammen eingegeben. Die Geschwindigkeit des Brenners ist frei programmierbar. Es gibt fixierte Programmabläufe, die eine Eingabe und somit die Fertigung vereinfachen. Dazu gehört der Befehl für die Wiederholschleife, der bedingte und unbedingte Programmsprung, Wartezeiten, Warten auf Eingänge.

7.2.6 Sensoren

Ein Schweißprozess ist umfangreicher Planung stets Störungen ausgesetzt. Solche Störungen können Fehlplatzierungen des Werkstückes sein, Abweichungen in der Geometrie und der Güte der Vorbereitung, oder Abweichungen in Maschinen- und Vorrichtungstoleranzen.

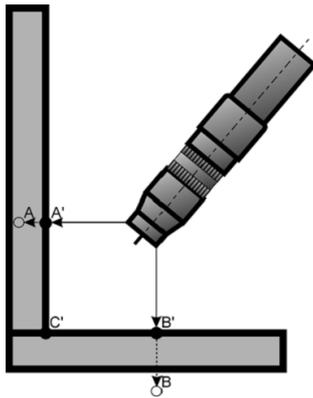
Ein erfahrener Handschweißer registriert diese Abweichungen visuell und kann sie manuell nach einem durch Erfahrungen gewonnenen Repertoire an Strategien ausgleichen.

Vollmechanischen Anlagen ist diese Art der Erfassung nicht möglich, sie müssen daher mit einer Reihe an Sensoren ausgestattet werden. Sensoren erfassen Prozessunregelmäßigkeiten und übermitteln ihre Information über Signale in die Steuerung. In der Steuerung werden entsprechende implementierte Regler aktiviert. Durch Stellglieder schließt sich der Regelkreis.

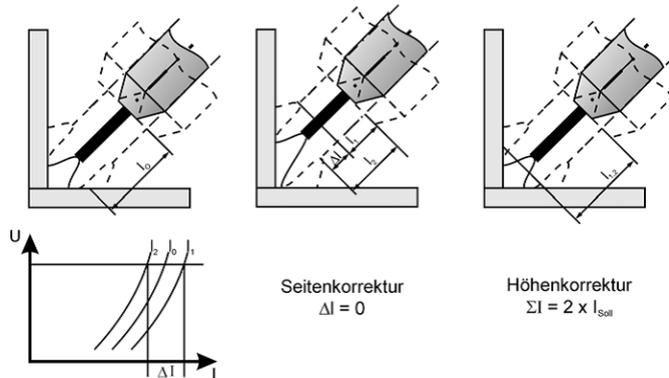
In der Schweißtechnik sind die wesentlichen Sensoren jene zur Überprüfung der Schweißnaht. Sie lassen sich nach ihren zwei Aufgabengebieten in Nahtanfangsfindung und Nahtverfolgung unterteilen.

Das Ideal eines Sensors wäre eine vorlaufende Messung direkt an der Schweißstelle, um Nachlauffehler zu vermeiden. Dabei ist ein Vorausschauendes Arbeiten von Vorteil, in dem der Nahtanfang selbstständig gefunden wird, und es Erkennungen von Ecken und Vermeidung von Kollisionen gibt. Ideal ist eine möglichst kleine Sensorgröße um die Zugänglichkeit nicht einzuschränken. Der perfekte Sensor vereint alle diese Vorteile. Aktuell wird fieberhaft an der Erreichung aller dieser Ziele für einen Sensor gearbeitet. Die Schweißindustrie hat bereits große Fortschritte in der Entwicklung von geeigneten Schweißsensoren hinter sich, es handelt sich dabei aber stets um eine dem Prozess zugeschnittene kompromissfähige Lösung. Zur bestmöglichen Überprüfung des Schweißprozesses werden mehrere Sensoren kombiniert. Abgesehen von den verschiedenen Sensorenbauweisen, werden Sensoren in Abhängigkeit ihrer zeitlichen Erfassung der Messdaten eingeteilt. Man spricht von Pre-, In- und Post-Sensorik. Pre-Sensoren nehmen die Messwerte vor der Bearbeitungsstelle auf und dienen vorwiegend der Nahtverfolgung. Sie erfassen die Ist-Position der Fuge und die Abweichungen in der Fugenweite. Letzteres macht wird zur Mengenregelung des Zusatzwerkstoffes verwendet. In-Sensoren sind während des Schweißvorganges aktiv und überprüfen beispielsweise das Schmelzbad. Post-Sensoren dienen der Qualitätsprüfung der erstarrten Schweißnaht.

In der Praxis haben sich aus aktueller Sicht taktile, optische und lichtbogenbasierte Sensorsysteme mit mechanischer Lichtbogenauslenkung bewährt. Taktile Sensoren erfassen Verschiebungen des Werkstückes im Raum durch Abtasten von drei Ebenen lässt sich ein Schnittpunkt im Raum ermitteln. Das Programm verwendet diesen Schnittpunkt zur Korrektur der Abweichung und verschiebt seine Daten um diesen Wert um den Nahtanfang zu finden. Dabei dient die unter Spannung gesetzte Gasdüse des Brenners zur Abtastung. Bei Kontakt mit dem Werkstück fließt ein schwacher Strom der von der Robotersteuerung als Signal für das Erreichen der abzutastenden Ebene gewertet wird.

Abbildung 53: Taktile Sensor⁴⁴

Lichtbogensensoren verfahren nach dem gleichen Prinzip. Sie werten dabei die bleibende Änderung des Schweißstromes bei Veränderung des Kontaktrohrabstandes aus (Abb.54), und ermitteln durch die Differenz der Ströme, wie sie auf einer Fugenflanke auftritt. Sie erlangen dadurch ein Signal zur Seitenführung, in dem sie einen Ist-Schweißstrom mit einem Soll-Schweißstrom vergleichen. Die Steuerung setzt einen Regler zur Kompensation von Abweichungen vom programmierten Nahtverlauf ein. Dieses Prinzip funktioniert nur bei deutlich zu erkennenden Flanken. In der Praxis wird der Lichtbogensensor häufig mit dem taktilen Gasdüsensensor zur Nahtfindung und -verfolgung kombiniert eingesetzt.

Abbildung 54: Lichtbogensensor⁴⁵

Optische Sensoren sind geeignet zur Nahtanfangsfindung, zur Nahtverfolgung und zur Erfassung des Fugenprofils, die Kombination ermöglicht deshalb auch zur Füllgradregelung. Optische Sensoren agieren als externe

Systeme. Sie sind stets vorlaufend vor dem Brenner geschaltet. Beide müssen daher über der Nahtfuge bewegt werden. Es ergibt sich als sinnvoll den Brenner und den Sensor auf getrennten Achsen anzuordnen. Ohne zusätzliche Achsen würde der Roboter Zugänglichkeit und in seinen vorhandenen Arbeitsbereich eingeschränkt. Eine gemeinsame Achse hätte den Nachteil eines enormen Aufwands zur steuerungstechnischen Integration in die Robotersteuerung. Hier müssen u.a. Informationen in Echtzeit ausgetauscht werden. Optischen Sensoren nutzen das Triangulationsprinzip oder eine Variante dieses Messverfahrens, dieses sei nun kurz erklärt.

⁴⁴ Ibid., 299.

⁴⁵ Grote et al., *Dubbel*, 748.

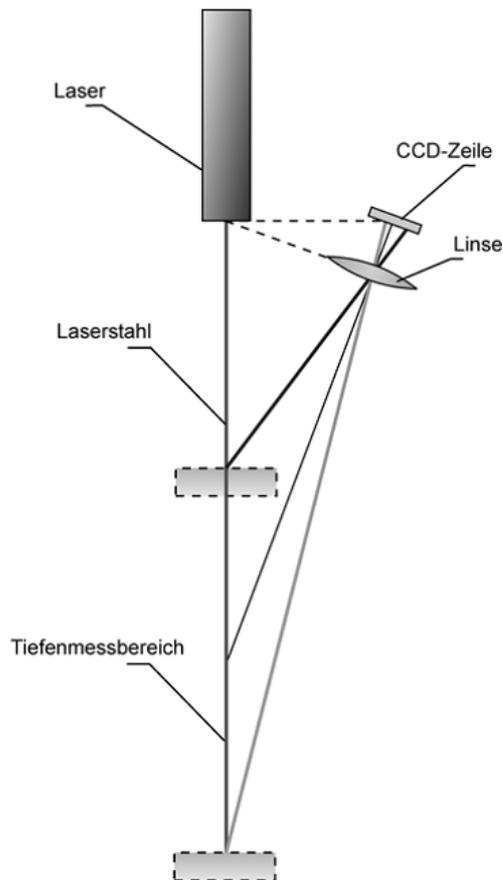


Abbildung 55: Triangulation

Triangulationsmessverfahren stellt Informationen über den Abstand zur Werkstückoberfläche zur Verfügung, durch Projektion eines Lichtpunktes auf der Werkstückoberfläche, welcher unter einem bestimmten Winkel auf ein zeilenförmiges Empfängerelement reflektiert und abgebildet. Kommt es nun zu einer Abstandsänderung, so ändert sich auch die entsprechende Position auf dem Empfängerelement (Abb. 55). Dieses Sensorverfahren dient ebenso als Grundlage für den Laserscanner, als auch für das Lichtschnittverfahren. Bei dem in Abb. 55 gezeigten Laserscanner wird dieses Prinzip um eine parallel zur Fugenachse liegende Pendelachse ergänzt. So wird die Messung einer Folge von Abständen entlang einer Linie ermöglicht. Es kann also eine zweidimensionale Erfassung und Auswertung der Fugenkontur gegeben werden.

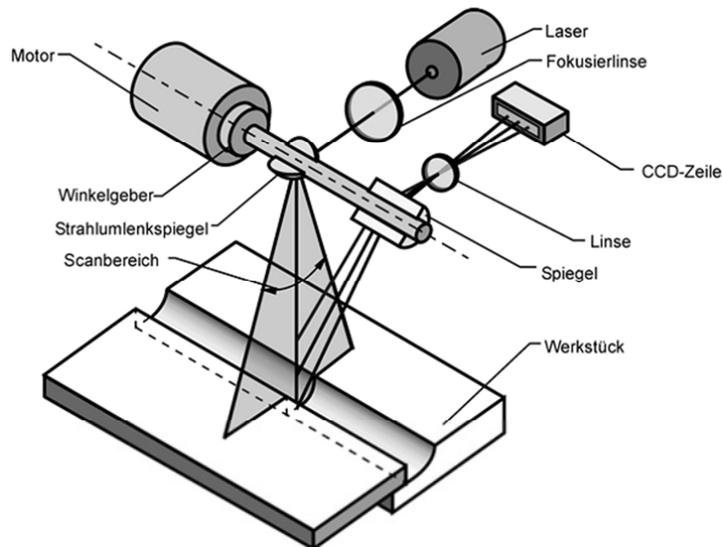


Abbildung 56: Prinzip eines Laserscannersensors⁴⁶

Das Lichtschnittverfahren stellt ebenfalls Informationen über die zweidimensionale Lage der Fuge zur Verfügung, dabei werden ein oder mehrere Lichtstreifen auf die Werkstückoberfläche projiziert und unter einem bestimmten Winkel auf eine CCD-Matrix abgebildet (Abb. 56). Anders als beim Scannern erfolgt hier die Informationsgewinnung bezüglich des Fugenprofils durch die Aufnahme einer Bildszene. In Abbildung 57 zeigt ein Sensorsystem, nach dem Lichtschnittverfahren.

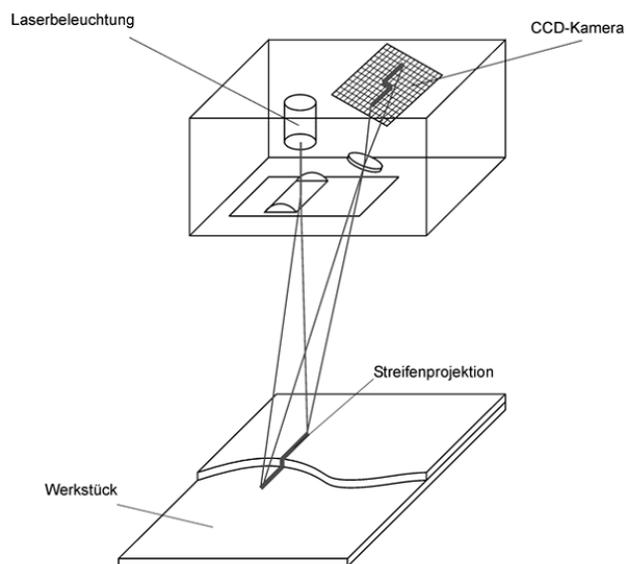


Abbildung 57: Lichtschnittverfahren⁴⁷

Bei beiden Verfahren ist durch eine Auswertung mehrerer über der Fuge nacheinander aufgenommener Bilder die Gewinnung dreidimensionaler Informationen möglich.

⁴⁶ "Festkörperlaser - TRUMPF Österreich," accessed September 17, 2013, <http://www.at.trumpf.com/produkte/lasertechnik/produkte/festkoerperlaser.html>.

⁴⁷ Fahrenwaldt and Schuler, *Praxiswissen Schweißtechnik*, 299.

7.3 WIG und MAG

Es gibt eine große Vielfalt an automatisierten WIG- und MAG-Fertigungslösungen. Hier werden beide Verfahren gemeinsam behandelt, da sie bis auf wenige Adaptionen, in ihrer Grundstruktur gleich aufgebaut sind. In beiden Fällen stellt die Schweißzelle den höchsten Automatisierungsgrad dar, und soll zuerst anhand der WIG-Schweißmethode erläutert werden.

Für eine Schweißzelle wird eine Hochleistungsstromquellen mit einem passenden Robotersystem (Beispielsweise von Fanuc, Kuka, Motoman, etc.) kombiniert. Im Fall einer vollautomatischen Roboterschweißzelle werden Bauteile auf 8 Achsen bearbeitet. Davon sind sechs Achsen Roboterachsen und zwei Achsen jene des Drehkipptisches. Zum Einsatz kommen sowohl bei WIG als auch bei MAG vermehrt Hohlarmroboter. In den letzten Jahren gab es einen stetigen Trend zum Einsatz von Hohlarmrobotern in Schweißzellen. Ein Hohlarmroboter besitzt eine zentraler Kabelführung, die eine erhöhte Bewegungsfreiheit, speziell für das WIG-Verfahren ermöglicht. Zuvor war diese Bewegungsfreiheit dem MIG- und MAG-Verfahren mit der im Brenner geführten abschmelzenden Elektrode vorbehalten. Diese Innovation ermöglichte die Verwendung des WIG-Verfahrens für kompakte Schweißzellenlösungen. Wechselbare Schlauchpakete und der einfache Austausch der Stromquelle machen eine eventuell Notwendige Umrüstung innerhalb eines Schweißverfahrens möglich.

Aktueller Stand der Technik für klein bis mittelgroße Produktionen ist einen kompakt Variante der Schweißzelle. Man spricht hier von einer mobilen Schweißzelle. Sie ist auf die essentiellen Bestandteile reduziert und daher sehr klein und kompakt, und hat den Vorteil einer geringen Investitionshöhe.

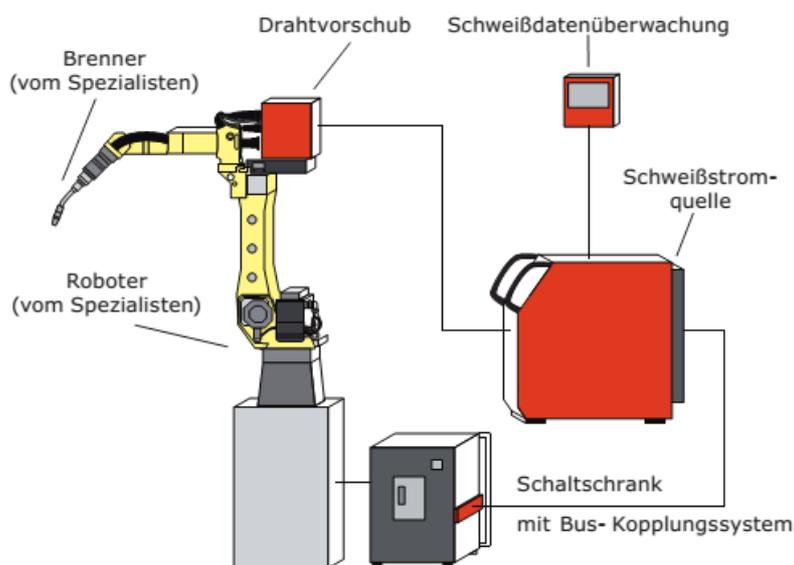


Abbildung 58: Mobile Schweißzelle der Firma Lorch zum MAG-Schweißen

Die Abbildung 58 zeigt einen solchen Aufbau. Dabei wird ein Hohlarmroboter mit einem Drahtvorschubkoffer ausgerüstet. Die Wahl des Vorschubkoffers ist abhängig vom verwendeten Verfahren. Ein Vorschubkoffer für das WIG-Schweißen führt den kalten oder erwärmten Schweißzusatz mit, und führt in seitlich an der Wolfram-Elektrode zum Lichtbogen. Der Vorschubkoffer eines MAG-Verfahrens führt die abschmelzende Elektrode, von der der Lichtbogen ausgeht, zentral und beaufschlägt sie mit dem nötigen Strom. In beiden Fällen ist eine Steuerungen und Synchronisierung des Vorschubs und der Spannung mit dem Roboter notwendig. Die Kommunikation zwischen Roboter, Vorschubkoffer und Stromquelle läuft über Bus-Kopplungssystem und ist in der Regel für alle gängigen Bus-Protokolle verwendbar. Bus steht für „Binary Unit System“ und ist ein Datenübertragungssystem über einen Gesamtübertragungsweg für verschiedene Teilnehmer. Früher wurden mit dieser Bezeichnung gemeinsame Stromschienen bezeichnet. Heute meint man damit Daten-Busse, also Datensammelleitungen. Sie geben Daten an Knoten angeschlossene Teilnehmer weiter. Dabei nennt man Knoten an denen Teilnehmer mit schreibrecht (Bsp. Sensoren) angeschlossen sind, aktive Knoten bzw. Master. Eine spezielle und hier relevante Bus-Art ist der Feldbus. Es handelt sich um ein Bus-System, das mit in einer Anlage mit Feldgeräten und in der anderen mit einer Steuerung verbunden ist. Feldgeräte sind Sensoren und Stellglieder. Diese kommunizieren über den Feldbus mit dem Steuerungssystem. Solche Datenübertragungssysteme werden in der Praxis meist seriell (über ein Kabelpaket) geschaltet und nicht einzeln mit der Steuerung (parallel) verbunden. Diese Art der Schaltung bedarf einer genauen Identifizierung der von den Feldgeräten eingehenden Daten. Die Identifizierung geschieht über Kennung (wer sendet die Daten), Messwert bzw. Befehl (was wird gesendet) und Initiative (wann wurde gesendet). Diese Identifizierungen liegen in sogenannten Bus-Protokollen normiert vor. Die bekanntesten und hier relevanten Feldbus-Arten sind, CAN (Vorwiegend in der USA in Gebrauch), Interbus, Profibus, DeviceNet (ein auf CAN basierendes und höheres Protokoll), EtherNet/IP (ein auf EtherNet basierendes höheres Protokoll). Relevant ist eine Feldbus-Datenübertragung für die Nahtverfolgung und zum Anschluss der Nahterkennungssensoren. Aktueller Stand der Industrie und das in Europa am häufigsten verwendete Datenübertragungssystem ist EtherNet/IP. Dabei handelt es sich um ein Echtzeit-Ethernet. Ethernet ist eine Datenübertragungstechnik, innerhalb geschlossener Netzwerke werden Daten zwischen verschiedenen Teilnehmern übertragen. Die Norm IEEE 802.3 standardisiert Ethernet, dies umfasst die Festlegung für speziell genormte Kabel und Steckverbindungen sowie die Paketformate und Protokolle. Es bildet die Basis für Übertragungsprotokolle wie, das bekannte, TCP IP oder IPX/SPX, etc. Die Kommunikation zwischen einzelnen Teilnehmern geschieht in geschlossenen Datenpaketen. Beim Echtzeit-Ethernet wurde die Verzögerung zwischen dem Senden und Empfangen eines Datenpaketes von mehreren Millisekunden auf unter

1ms reduziert. Zu dieser Klasse gehört das EtherNet/IP. Ein Bus-Kopplungssystem bildet die notwendige Schnittstelle zwischen der der Stromquelle bzw. dem Vorschubkoffer und der Robotersteuerung. Dabei werden alle Signale und Informationen der Stromquelle (Taktile Sensoren, Spannungen, Stromstärken, etc.) in das notwendige Feldbus-Protokoll übersetzt. Die Basisversion einer aktuellen Schweißzelle besteht aus einem massiven Basisrahmen mit Staplerschuhen, um eine größtmögliche Mobilität zu gewährleisten (Abb. 58). Aufgestellt wird die Zelle auf höhenverstellbaren Standfüßen. Wichtig ist dabei die Berücksichtigung der notwendigen Stabilität und Lagerung der Zelle, um optimale Fertigungsbedingungen sicher zu stellen. Umkleidet wird das Innere der Schweißzelle mit einer Schutzverkleidung. Sie garantiert die Unzugänglichkeit des Arbeitsbereiches für Menschen während der Fertigung, und optimiert die Erreichung einer Schutzatmosphäre. Zusätzlich zu der Schutzverkleidung sind aktuelle Modell mit mehreren Sicherheitseinrichtungen ausgestattet die sich gegenseitig ergänzen oder ersetzen, sollte eine dieser Maßnahmen ausfallen oder defekt sein. Solche Vorrichtungen sind Schutzzäune zur physikalischen Abtrennung, Lichtschranken und Trittmatten. Wie bereits erwähnt schalten die Schweißzellen automatisch ab sollte einer dieser Sicherheitsmaßnahmen durch unplanmäßiges Betreten alarmiert werden. Eine zusätzliche Sicherheitsmaßnahme die sich in den letzten Jahren auch aus bedienungstechnischen Gründen durchgesetzt hat ist die Verlagerung des Bedienfeldes an die Außenseite der Schweißzelle. Sie fungiert als Hauptsteuerung, sodass das Betreten des Arbeitsbereiches nur im Falle einer Störung zwingend wird. Durch diese konstruktive Maßnahme können sowohl Arbeitsunfälle als auch Stillstandzeiten verringert werden. Zusätzlich wird die die Servicetür mit der Hauptsteuerung gekoppelt, sodass sich bei ihrem Öffnen der Totmann-Schalter aktiviert. Diese Sicherheitsvorrichtung schaltet den Schweißbrenner und die Anlage automatisch ab.

In der simpelsten Ausführung wird eine Roboterzelle ist mit einem Drehtisch mit einem manuellen Schwenkmechanismus ausgestattet. Es handelt sich dabei um keine vollautomatische Lösung, da der Werkstückwechsel von Hand geschieht. Während ein Mitarbeiter auf einer Seite den Werkstückträger be- und entladet, schweißt ein Roboter auf der anderen Seite automatisch. Dabei sind diese beiden Seiten durch eine Sicherheitswand getrennt (Abb.59). Auf diesem Drehtisch kann das nächste Werkstück vorbereitet werden, während im Inneren automatisch geschweißt wird. Solche Systeme werden von allen gängigen Herstellern mit einem manuellen, pneumatisch-unterstützten Drehmechanismus mit zur Lagenarretierung ausgestattet, welcher durch einen Fußschalter oder Handschalter ausgelöst wird.

Diese Ausführung der Roboterzelle kann auch um eine automatische Werkstückbeladung durch einen zweiten Roboter oder eine Fließbandzuführung ergänzt werden, und so vollautomatisiert werden.

Schweißzellen werden aufgrund ihrer einzelnen Komponenten stets auf ein spezielles Schweißverfahren ausgelegt. So ist das Umrüsten einer Schweißzelle vom WIG-Schweißen auf MAG-Schweißen aufwendig und unwirtschaftlich. Der Roboterarm und die Steuerung wären für beide Verfahren universell verwendbar, sofern es sich um einen Hohlarmroboter handelt. Die wesentliche Limitation ist die spezifische Stromquelle, der Drahtvorschubkasten und das Schlauchpaket. Während beim WIG-Verfahren der Drahtvorschubkasten den Schweißzusatz seitlich an der Elektrode vorbei zur Schweißstelle führt, regelt der MAG-Vorschubkasten die Schweißelektrode selbst und beaufschlagt sie mit Strom. Zu berücksichtigen ist auch das taktile Naherkennungssensoren direkt auf dem Brenner montiert und somit auch bei einem Wechsel des Vorschubkastens zu berücksichtigen wären. Die heutigen hochleistungsfähigen Stromquellen sind auf die Verwendung und Regelung eines bestimmten Schweißverfahrens zugeschnitten. Es können beispielsweise innerhalb der des WIG-Verfahrens die jeweiligen Schweißparameter stark variiert werden, doch ist zurzeit eine Verwendung für beide Verfahren noch nicht möglich. Aktuell können MAG- bzw. MIG-Stromquellen ohne großen Aufwand beispielsweise zum Implusschweißen aufgerüstete werden, oder zu leistungsstärkeren Speed-Welding-Optionen. Genauso verhält es sich mit dem Schlauchpaket. Es ist zwar ohne großen Aufwand möglich zwischen verschiedenen Zusatzdrähten (Material, Stärken) zu wechseln, aber nicht zwischen den Verfahren. Grund dafür ist der unterschiedliche Aufbau und die Anforderungen an das gesamte Schlauchpaket. Sollte daher im Zuge der Fertigung ein Wechsel zwischen diesen Verfahren nötig werden müsste man sowohl den Drahtvorschubkasten, die Stromquelle als auch das Schlauchpaket wechseln.

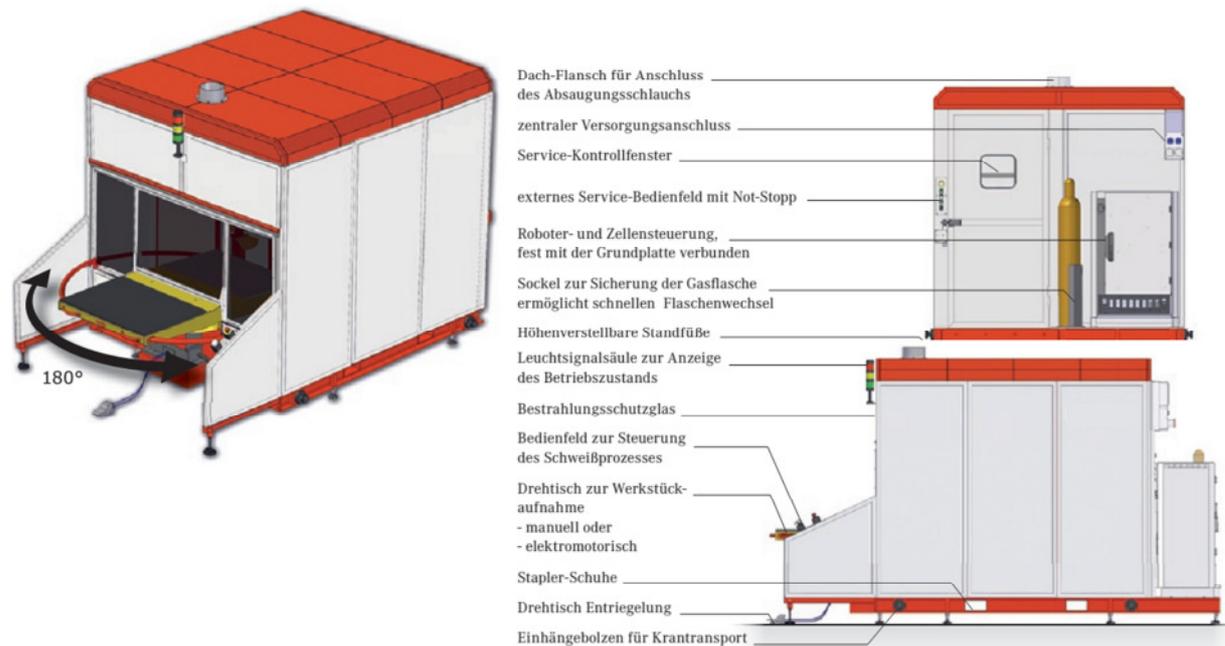


Abbildung 59: Schweißzelle der Firma Lorch

7.4 Laser

Das Spektrum der Maschinen und Anlagen für das Laserstrahlschweißen ist sehr groß. Es reicht von einem Handarbeitsplatz bis hin zu einer voll automatisierten 3D-Fertigungszelle. Dabei werden Laser als vielseitige Werkzeuge zum Schneiden, Schweißen, Beschriften, Bohren, Beschichten, Härten und auch zur strukturellen Bearbeitung von Oberflächen eingesetzt. Die Bearbeitungen von feingliedrigen Strukturen im Zehntelmillimeterbereich ist genauso möglich, wie die Bearbeitung von 30 mm starken Blechen. Abhängig von ihrem Leistungsbereich können Laser ebenso zur Bearbeitung von Holz, Papier, Kunststoff wie auch Stahl genutzt werden. Die meisten Laseranlagen wurden nach dem Baukastenprinzip entwickelt und kombiniert. So ist ein stetiges Nachrüsten problemlos möglich. Vorteilhaft ist das Laserstrahlschweißen, da sich durch verhältnismäßig kleine Adaptionen eine fertigungstechnische Erweiterung vom Schweißen zum Schneiden, Bohren oder Beschriften erzielen lässt. Der Aufbau einer Laseranlage ist abhängig von dem verwendeten Verfahren, dem zu bearbeitendem Werkstück und ihrem Automatisierungsgrad. Trotz der Individualisierung der Laseranlage auf eine bestimmte Fertigung gibt es einen grundlegenden schematischen Aufbau einer Laseranlage, der in der Abbildung 60 gezeigt wird. Aktuell ist in der Industrie ein Trend zu Laseranlagen mit Scanneroptik zu erkennen.

7.4.1 Allgemeiner Aufbau einer Schweiß-Laseranlage

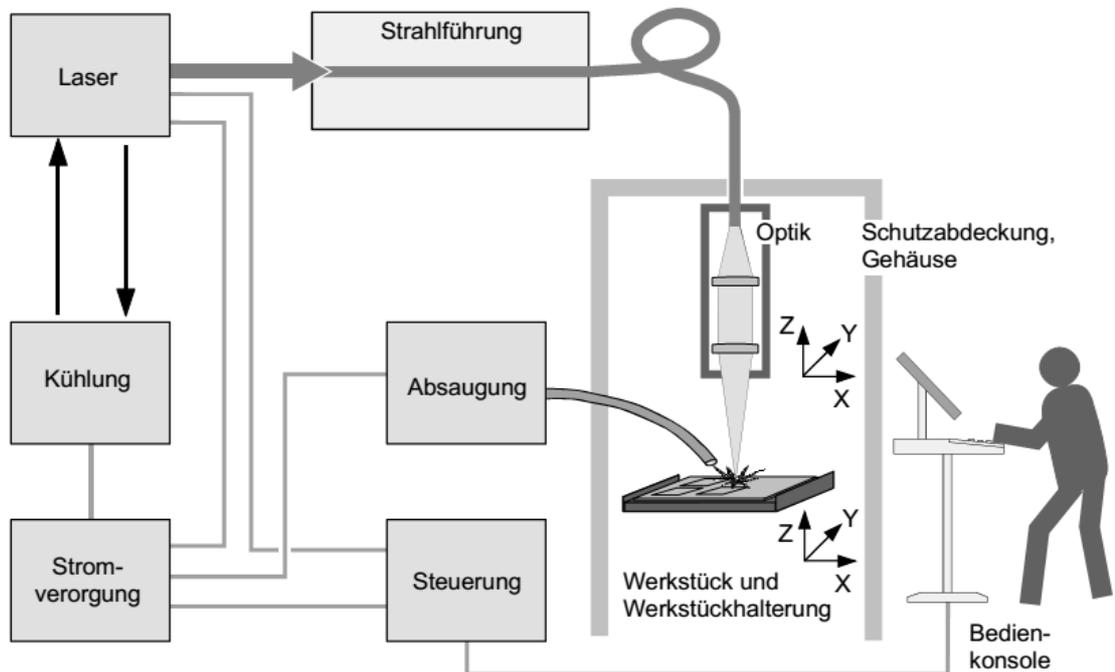


Abbildung 60: Schema einer Laseranlage⁴⁸

Das Kernstück einer jeden Laseranlage ist das Lasergerät, welches aus dem jeweiligen Laser, seiner Stromversorgung und seinem Kühlsystem besteht. Von dem Lasergerät aus wird der Laserstrahl über Auskopplungssysteme und Lichtkabelleiter, Einkopplungssysteme und Optik, zur Arbeitsstation geleitet. Man spricht in der Gesamtheit dieser Komponenten von der Strahlführung. In der Basisausführung besteht eine Laseranlage aus einem Lasergerät zur Erzeugung des Laserstrahls, wobei aus Festkörper- und Gaslasern ausgewählt werden kann. Des Weiteren bedarf es einer Strahlführung, zur Leitung des Laserstrahles, und einer Bearbeitungsoptik, die für die Fokussierung des Strahls verantwortlich ist. Überdies besitzt jede Laseranlage ein Maschinengestell, welches die einzelnen Komponenten trägt, eine Werkstückauflage und eine Werkstückaufnahme. Dem aktuellen Stand der Technik nach verfügen die meisten Maschinen serienmäßig über hochdynamische Rotationswechsler. Ihr Einsatz steigert die Produktivität bei gleichzeitiger Senkung der Teilekosten. Ermöglicht wird dies durch Kombination der schnellen Drehzeit des Tisches und der optimierten Steuerungsabläufe. Dadurch werden die Nebenzeiten verringert was zur Verkürzung der gesamten Zykluszeit beiträgt. Es bedarf auch einer Absaug- und Filteranlage zusammen mit Schutzvorrichtungen, um den Bediener und seine Umgebung vor Strahlung und Nebenprodukten wie Dämpfen zu schützen. Dazu gehören Schutzabdeckungen und Gehäuse ebenso wie die Absaugung. Die gesetzlichen Anforderungen an Laseranlagen müssen erfüllt

⁴⁸ „Schweißzellen“, [schweisstechnik.at](http://www.schweisstechnik.at), zugegriffen 19. August 2014, <http://www.schweisstechnik.at/category/257/schweiszellen>.

werden. Diese beinhalten eine Schutzkabine aus Blech zur Abschirmung der Anlage nach außen. Von vollständigen Schutzabdeckung spricht man wenn sie den gesamten Arbeitsbereich umgibt. Wichtig für eine konforme Schutzvorrichtung ist die elektronische Überwachung der Öffnung aller Zugänge, wie Türen und Hauben. Die Anlage hat bei der Öffnung der Türen durch den Bediener während der Bearbeitung automatisch abzuschalten. Um die Augen des Bedieners zu schützen sind spezielle Filtergläser zu verwenden, die einen geschützten Blick auf die Bearbeitungsstelle erlauben. Um die einzelnen Bearbeitungsschritte zu regeln und ihren Fortschritt zu überwachen wird eine Steuerung benötigt. Sie ist mit einer Bedienkonsole, der Schnittstelle zwischen Bediener und Maschine, verbunden. Die Überwachung des Fertigungsprozesses geschieht über ein Mess- und Regelsysteme bestehend aus Sensoren und Stellgrößen die bei Bedarf eingreifen. Das Handhabungssystem oder der Werkstückhalter übernimmt die Aufgabe der Fixierung bzw. Bewegung des Werkstückes in der Arbeitsstation. Es muss nicht zwangsläufig das Werkstück bewegt werden, da in vielen Fällen eine Bewegung der Fokussieroptik zur Bearbeitung hinreichend ist. Die Scanneroptik ist in der Lage den Laserstrahl entlang komplexer Konturen mit hoher Genauigkeit und Geschwindigkeit zuführen, ohne sich dabei zu bewegen. Ein bereits bestehender Laserarbeitsplatz mit gepulsten Scheiben-, Faser- oder Diodenlasern kann mit einer programmierbaren Scanneroptik aufgerüstet werden. Diese Ausführung hat neben den vergleichsmäßig niedrigen Investitionskosten den Vorteil einer hohen Flexibilität und ist sowohl für kleine als auch für mittlere Serien geeignet. Die Verwendung einer programmierbaren Scanneroptik ermöglicht es bei der Bearbeitung, weder das Werkstück noch die Optik zubewegen, und so die Prozesszeiten zu reduzieren. Sie kann auch weiter aufgerüstet werden, durch eine optionale Linearachse, oder durch einen mit Servomotoren getriebenen Drehkipptisch. Zum Teilaustausch wird häufig von einem fahrbaren Arbeitstische eines Linearwechslers Gebrauch gemacht. Für hohe Stückzahlen eignet sich am besten ein Rotationswechsler, der die Bauteile in eine Be- und Entladeposition bringt. Wird zum Be- und Entladen menschliche Kraft benötigt so ist auf die Sicherheit des Bedieners stets Rücksicht zu nehmen. Zu diesem Zweck werden Zwei-Stationen-Betriebe eingesetzt, sie teilen über eine Trennwand den Arbeitsraum in zwei Bereiche. Die Be- und Entladung kann durch den Einsatz von Roboter vollautomatisiert werden. Als Achsantriebe werden wartungsfreie, digital gekoppelte Servomotoren mit direktem Wegmesssystemen verwendet, um eine hohe Bahngenauigkeit zu gewährleisten. Mit diesen Antriebssystemen ist eine hohe Positioniergeschwindigkeit und Achsbeschleunigung zu erreichen. Das Heranfahren der Fokussieroptik an das Werkstück und somit in die Nähe des Schweißbades, setzt es Verschmutzungen durch Dämpfe und Spritzern aus. Um diese Verschmutzung zu verhindern wird seitlich an der Fokussieroptik eine Gasdüse mit Schutzgase geführt. Zusätzlich werden sämtliche Spiegel mit Wasser rückseitig gekühlt, um konstante optische Bedingungen und eine hohe

Prozessstabilität zu sichern. Um einen bestmöglichen Schutz der Linse zu garantieren, wird sie mit einem Wärmesensor ausgerüstet, der bei zu hohen Temperaturen, über die Steuerung ein Abschalten erwirkt, bevor die Linse verdampft. Die Prozessstabilität ist ein wertvoller Garant für die Güte des Fertigungsprozesses. Daher wurden vielfältige Maßnahmen entwickelt um diese zu sichern. Eine Neuheit ist die Güteschaltung. Sie reguliert die Pulsüberhöhung. Im Resonator befindet der Güteschalter (engl.: Quality-Switch), der den Lichtweg unterbricht und wieder freigibt. Während das aktive Medium kontinuierlich mit einer geringen Leistung angeregt wird bleibt der Güteschalter geschlossen. Der Güteschalter ist zunächst geschlossen. Erst wenn ein höherer energetischer Zustand erreicht worden ist, öffnet sich der Güteschalter und gibt den Weg frei. Lawinenartig wird ein Laserpuls aufgebaut, der alle angeregten Atome zum Emittieren stimuliert. Es können so hohe Leistungsspitzen erzielt werden. Anschließend stoppt der Laserprozess. Der Güteschalter schließt und der Zyklus beginnt von Neuem. Der Güteschalter dient also dem präzisen Ein- und Ausschalten des Laserstrahls und reguliert die Pulsdauer und die Pulsspitzenleistung.

Eine weitere Innovation ist die serienmäßige Verwendung von Lasernetzwerken. Die Grundidee ist, dass ein Lasergerät kontinuierlich Laserlicht erzeugen kann, dieses aber nicht ununterbrochen in der Bearbeitungsstation gebraucht wird. Mit einem Lasernetzwerk, bestehend aus Lichtleiterkabeln, Datenkabeln und Steuerungsmodulen lässt sich das Laserlicht einer oder mehrerer Lasergeräte an mehreren Bearbeitungsstationen effizient nutzen. In nur wenige Millisekunden wird die gerade arbeitende Bearbeitungsstation durch Umschalten vom Lasergerät mit Laserlicht versorgt. So ist eine hohe Auslastung der Lasergeräte erzielbar. Ein weiterer Aspekt ist die verbesserte Verfügbarkeit einer Laseranlage, da bei Wartung eines Lasergerätes die Anlage über das Lasernetzwerk von einem anderen Lasergerät versorgt wird. Diese Versorgung geschieht meist automatisch und reduziert Stillstandzeiten. Die mit verlegten Datenkabeln dienen der eindeutigen Identifizierung, sowie der Übermittlung von Steuerungsdaten. Sie ermöglichen auch ein einfaches Umstecken ohne Justierung (Plug and Play).

Der Einsatz von Sensoren zum automatisierten Schweißen ist für eine hinreichende Nahtqualität zwingend, und dient der präzisen Verfolgung des Fügespalt durch den Laserstrahl. Sie verfolgen Verlauf des Fügespalts und überwachen die Position des Laserstrahls taktil oder berührungslos. Bei Abweichungen vom programmierten Sollwert, nimmt der Sensor den Istwert auf, welcher an die Steuerung weitergeben wird. In weiterer Folge korrigiert ein Regler die Position. Mittlerweile sind Sensoren so ausgereift, dass sie eine Schwankung der Breite des Fügespalts erkennen. Wenn mit Zusatzwerkstoff gearbeitet wird, passt der Regler die Drahtgeschwindigkeit an, und füllt so den Fügespalt optimal auf.

8 Ergebnisse und ihre Auswertung

Aus einer Vielzahl von Schweißverfahren wurden drei für die Konstruktion und die Fertigung des Forschungsprojektes geeignete ausgewählt und in eigenen Abschnitten vorgestellt. Im Zuge der Recherchen wurden durchaus auch unkonventionelle Ideen und Visionen verfolgt. Trotzdem ergab die erste Aufgabenstellung dieser Arbeit das Ergebnis, dass die konventionellen und (bis auf das Laserstrahlschweißverfahren) bereits verwendeten Schweißverfahren beizubehalten sind. Die Auswahl eines auf ein angepassten Schweißverfahren ist eine komplexe Optimierungsaufgabe in der auf Schweißbeignung, Schweißbarkeit und Schweißmöglichkeit Rücksicht genommen werden muss. Erst wenn diese Aspekte abgewogen und als hinreichend befunden worden sind, spricht man von der Schweißbarkeit eines Bauteils mit dem jeweiligen Schweißverfahren (Kapitel 2.3). In der Praxis handelt es sich dabei um ein stetiges Wechselspiel der Anpassung zwischen der Konstruktion des Bauteils selbst und des Fertigungsverfahrens. Erst dann ist eine optimale Abstimmung und Schweißbeignung zu erreichen. Hier war dies nicht möglich, Grund war die Art der Fertigung. Es handelte sich dabei stets um eine Auftragsfertigung, mit von Kunden herangetragenen Zeichnungen. So war das Wechselspiel zwischen Fertigung und Konstruktion nicht gegeben, zum Nachteil der Fertigungsdauer.

Das Ergebnis der Auswahl von geeigneten Fertigungsverfahren für diese Konstruktion, beschränkte sich, neben dem neuen Laserstrahlschweißverfahren, auf die bereits im Gebrauch stehenden Verfahren des WIG- und MAG-Schweißens. Für das Laserstrahlschweißen ist sowohl die Schweißbeignung des Werkstoffs X3CrNiMO13-4 gegeben, als auch die Schweißsicherheit auf Grund der hohen Nahtqualität. Einzig die Schweißmöglichkeit, im Genaueren die Zugänglichkeit der Schweißnaht stellt eine Limitation dar.

Aus „Metallurgischer“-Sicht sind alle drei Verfahren geeignet. Einzig das Laserstrahlschweißverfahren bedarf einer verstärkten Berücksichtigung, da das Gefälle der Wärmeeinflusszone auf Grund der starken fokussierten Wärmeeinbringung sehr groß ist. Eine hohe Energiedichte, wie sie beim Laserstrahlschweißen üblich ist, bewirkt eine schmale WEZ und somit einen drastischen Gefügeunterschied der nachzubehandeln ist. Die Materialspannungen können aber durch das Spannungsanglühen ohne weiteres behoben werden. Da bereits in der ursprünglichen Fertigung per WIG- und MAG-Verfahren geschweißt wurde, kann hier auf diese Verfahren ohne weiteres zurückgegriffen werden, ohne an der Fertigungsgüte zu zweifeln. In späterer Folge wird auf die mögliche Limitation ihrer Automatisierung eingegangen. Bei dem Laserstrahlschweißen wiederum ist auf die spezielle Ausführung der Fugenvorbereitung zu achten. So muss bei einem zu

breiten Fugenspalt Zusatzwerkstoff hinzugefügt werden. Im Projektfall muss der Fugenspalt der X-Naht mit Zusatzwerkstoff in bis zu zehn Schichten aufgefüllt werden. Eine mögliche Lösung ist die Kombination des Laserstrahlschweißens mit dem WIG-Schweißverfahren. Bei diesem Hybridverfahren wird unmittelbar nach dem Laserstrahl ein WIG-Schweißkopf mit einer Zusatzwerkstoffspeisung nachgeführt. Der Laserstrahl dient durch seine hohe Energiedichte der Aufschmelzung der Schweißnaht, während das WIG-Verfahren das bereits bestehende Schmelzbad mit Werkstoff auffüllt. Diese Hybridmethode findet in der Praxis gerade bei großen Fugenbreiten Gebrauch. Kritisch dabei ist die notwendige Zugänglichkeit der Schweißnaht. Auf Grund von fehlenden Adaptionmöglichkeiten der Bauteilkonstruktion scheidet diese Fertigungsmethode aus. Die Strömungskanäle zwischen den Schaufeln sind zu eng, um sowohl die Laseroptik als auch die WIG-Schweißbrenner unmittelbar nacheinander über die Naht zu führen. Eine andere Möglichkeit wäre das Tiefschweißverfahren, bei dem eine Nahttiefe von einem zehnfachen der Nahtbreite geschweißt werden kann. Hierfür müsste die Konstruktion bei einer Nahttiefe von zehn Millimetern X3CrNiMO13-4 auf beiden Stoßseiten mit einem Materialzusatz von zwei bis drei Millimeter bedacht werden. Vorteilhaft an dieser Option ist das Wegfallen eines großen Teils der Fugenvorbereitung, da auf einer X-Naht (auch doppelte V-Naht genannt) verzichtet werden kann, ein I-Stoß wäre ausreichend. Die größte Schwierigkeit der Automation für dieses Forschungsprojekt stellt die unzureichende Zugänglichkeit der Schweißnaht dar. Alle Automatisierungsverfahren benötigen Naherkennung- und Verfolgungssysteme. Aktuell existieren auf dem Markt und in der Forschung keine optischen und taktilen Systeme, die für so enge Strömungskanäle geeignet wären oder eine ausreichende Prozessstabilität gewährleisten könnten. Taktile Sensoren sitzen direkt auf dem Brennerkopf und wären so von ihren Abmessungen her durchaus geeignet. Sie sind aber nicht in der Lage Abweichungen in der Fugenbreite oder Fugenvorbereitung zu erkennen und sind daher nicht ausreichend für einen stabilen Prozess. Sie dienen rein der Positionsbestimmung des Brenners in Relation zur Fuge. Optische Systeme wie Kamerasysteme wären eine geeignete Ergänzung. Sie werden anders als taktile Systeme nicht als In-Sensorik sondern als Pre-Sensorik (vorlaufend) geführt. Wieder ist der benötigte Platz Grund für die Unrealisierbarkeit. Sensoren sollten, um eine ausreichende Vorlaufzeit für die Steuerung zu realisieren, auf einer eigenen Achse geführt werden. Es gibt von Laserherstellern bereits Systeme einer leistungsstarken Fokuseroptik mit integriertem Kamerasystem. Diese Systeme werden drei bis vier Millimeter neben der Bearbeitungsstelle geführt und haben sich in den letzten Jahren wesentlich verbessert (früher fünfzig Millimeter Abstand). Problematisch beim Einsatz von Naherkennungssystemen ist die hohe Variation an Werkstücken, da es sich um eine Auftragsfertigung handelt. So müsste, unabhängig für welches Verfahren man sich entscheidet, stets eine dem Auftrag angepasste Programmierung durchgeführt werden. Wie bereits erklärt gibt es zwei grundlegende Arten der Programmierung,

Offline und Online. Da bei einer Auftragsfertigung eine Individualisierung der Makros sehr aufwändig ist und einem Neuschreiben gleichkommen würde. Dem gegenüber steht die Option einer CAD-unterstützten Programmierung. Nachteilig an dieser Variante ist, dass über das Teach-In-Verfahren in jedem Fall der Fugenanfang eingegeben werden muss. Für eine Mehrlagenschweißung (WIG,MAG) gestaltet sich dies als sehr aufwendig. Für Laserstrahlschweißung ist trotz des Vorteils einer Einlagenschweißung (Tiefschweißen) die Umsetzung auf Grund der Größe der Fokuseroptik nicht möglich. In der Praxis wird bereits eine farbliche Hervorhebung der Naht für Kamerasysteme umgesetzt. Dies kann aber auf die Bedingungen des Forschungsprojekts (Zugänglichkeit) nicht umgesetzt werden, da die Größe der Kamera dies nicht zulässt. Es kann also in allen Automatisierungsfällen nicht auf einen Mitarbeiter zu Aufsichtszwecken und zur Positionierung verzichtet werden. Letzteres verursacht unausweichliche Stillstandszeiten.

Die WIG- und MAG-Verfahren haben sich bereits in der manuellen Fertigung bewährt. Im Kapitel Forschungsprojekt wurde erklärt, dass die Wurzelnaht auf Grund der hohen Qualitätsansprüche an die Festigkeit mit dem WIG-Verfahren verschweißt werden muss. Diese Tatsache schließt eine alleinige Verwendung des MAG-Verfahrens aus. Somit besteht nur noch die Option einer reinen WIG beziehungsweise einer Kombination des WIG- und MAG-Schweißverfahrens. Das WIG-Verfahren hat den Nachteil, dass es im Vergleich MAG-Verfahren nicht so leistungsstark ist und für größere Fugenbreiten (ab der fünften Schweißlage) nicht geeignet ist. Somit bleibt für die Automatisierung nur noch eine Kombination der beiden Verfahren. Aus Kostengründen ist das Ausrüsten einer Schweißzelle mit zwei Schweißrobotern, einem WIG-Schweißroboter und einem MAG-Schweißroboter nicht haltbar. Andererseits ist das stetige Umrüsten eines WIG-Schweißroboters auf das MAG-Verfahren aus wirtschaftlichen Gründen (Stillstandszeiten sowie Lohnkosten) nicht rentabel. Eine Umrüstung würde sowohl den Drahtvorschubkasten, den Schlauchpakt als auch den Brennerkopf mit eventuell montierten taktilen Sensoren betreffen und gestaltet sich daher nicht als zielführend für die Produktivitätssteigerung. Zumal um einen Verzug des Bauteils zu vermeiden, zuerst vier Schaufeln diagonal wurzelgeschweißt und anschließend über das MAG-Verfahren aufgefüllt werden müssen. Bei einer Beibehaltung dieses Fertigungsablaufes müsste zum Schweißen eines Laufrades eine mehrfache Umrüstung zwischen WIG und MAG stattfinden. Dieser Ablauf könnte aus schweißtechnischer Sicht abgeändert werden. Es kommt aber erschwerend hinzu, dass es sich um eine Mehrlagenschweißung handelt und daher jede Schweißnaht nach ihrer Erstellung geprüft werden muss. Somit stellt die Spannvorrichtung eine weitere Limitation dar. Ausgehend von der Verwendung eines Drehkipptisches mit Servoantrieb muss das Werkstück nach jeder erstellten Schweißlage abmontiert und geprüft werden (Ultraschall, Fluxprüfung). Da diese Prüfung nicht innerhalb der Schweißzelle stattfinden kann wäre eine vollständig geschlossene Schweißzelle

ungeeignet. Eine offene Schweißzelle, oder auch mobile Schweißstation genannt, stellt ein erhöhtes Sicherheitsrisiko für den Mitarbeiter dar. Zumal in jedem Fall Be- und Entladung auf Grund der Stückzahlen manuell erfolgt. In beiden Fällen (WIG/MAG) stellt die Zugänglichkeit der Brennköpfe zum Fugenverlauf die größte Problematik dar.

Die hohe Präzision und das breite Einsatzgebiet des Laserstrahlschweißens hat durchaus zu Überlegungen abseits der Rahmenbedingungen des Forschungsprojektes verleitet. So wäre eine Fertigung durch Laserstrahlschweißung durchaus umsetzbar. Voraussetzung dafür ist eine Anpassung der Konstruktion und eine Änderung des Fertigungsablaufes. Hierfür müsste man vom Fräsen der Laufradhälften (inkl. Schaufel) aus dem Vollen absehen. Stattdessen müsste man die Schaufeln einzeln und mit Materialzusatz an den beiden Kontaktseiten fräsen. An den beiden Laufradober- und Unterseiten werden passende Schlitze durchgefräst, um in späterer Folge die Schaufeln in diese stecken zu können. Nachdem alle Schaufeln gesteckt worden sind, können sie ohne weitere Schwierigkeiten von beiden Laufradseiten mit einem Laser verschweißt werden. Diese Methode wird in der Praxis bereits erfolgreich angewendet.

9 Resümee und Ausblick

Aus den vorigen Seiten geht hervor, dass ein Umstieg von der manuellen Fertigung zur Automatisierung, ohne Zugeständnisse der Konstruktion, speziell der Zugänglichkeit, nicht zu bewältigen ist. Es ist durchaus beeindruckend, zu sehen mit welchen rasanten Fortschritten sich die Automation ihren festen Platz in der Schweißtechnik erkämpft hat. Dabei war es ein durchaus langer Weg. 1961 wurde der erste Roboter namens UNIMATE in einem General Motors Werk zur Handhabung und Schweißung von Motorteilen eingesetzt⁴⁹. Heute werden nun gesamte Fertigungsprozesse mit einer großen Zielstrebigkeit automatisiert. Dabei wird in einigen Fällen, entgegen der optimalen Lösung für die Fertigung, zu Gunsten der Automation entschieden. Dies mag von mehreren unterschiedlichen Faktoren abhängen. Hinzugekommen zu diesen ist das prestigeartige Ansehen, das ein produzierendes Unternehmen mit einer automatisierten Fertigung genießt.

Es spielen sich zur Zeit sehr interessante Entwicklungen in der Lasertechnik ab. Dies vor allem deshalb, weil sie aufgrund ihrer Vielseitigkeit der Anwendbarkeit als Werkzeuge zum Schneiden, Schweißen, Beschriften, Bohren, Beschichten, Härten und auch zur strukturellen Bearbeitung von Oberflächen, verwendet werden können. Genauso vielseitig wie ihre Einsatzmöglichkeit ist auch ihr Einsatzgebiet, welches von der Medizintechnik über die Verpackungsindustrie bis hin zum schweren Maschinenbau (z.B. Schiffsbau) reicht.

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass eine optimale fertigungstechnische Lösung stets ein Wechselspiel zwischen der Konstruktion selbst und ihrer Fertigung darstellt. Es ist also nicht verwunderlich, dass eine einseitige Anpassung, wie die der Fertigung, ohne Zugeständnisse des anderen Bereichs, in den seltensten Fällen von Erfolg gekrönt ist. Dies bezieht sich nicht nur alleine auf die Schweißtechnik, obwohl hier die Auswirkungen sehr klar ersichtlich sind. Das Konzipieren und Fertigen eines Bauteils ist das Ergebnis einer langen Reihe an Anpassungen und Kompromissen. Auf diesem Weg sollte man stets auch unkonventionelle Wege, fernab der zeitgenössischen Methoden erwägen dürfen. Denn schließlich sind es diese, die den Fortschritt der letzten Jahrzehnte getragen haben. Schon Henry Ford (30.07.1863-07.04.1947) formulierte diese Überzeugung sehr treffend aus: *„Wer immer tut, was er schon kann, bleibt immer das, was er schon ist.“*

⁴⁹ Tzyh-Jong Tarn, Shan-Ben Chen, und Changjiu Zhou, *Robotic Welding, Intelligence and Automation* (Springer Science & Business Media, 2007), Kap. Introduction.

10 Anhang

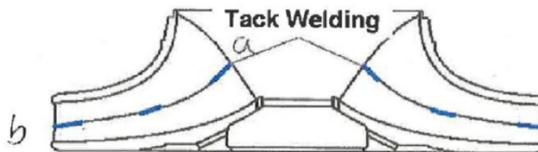
10.1 Anhang A: Schweißdatenblatt

Location:
Manufacturer:
**Weld.-Pros.-Approval-Record-
 WPAR-Nr.:**
Code-Name:
Order-Nr.: 004
Position Nr.: 1
Component Description: Francis Laufrad
Name der Schweiß:
Schweißprozess: 141

Nahtart: BW (Stumpfnah)
**Einzelheiten der Fugenvorbereitung-
 Zeichnungsnummer:** 052.09237.V1.100
Art der Vorbereitung & Reinigung: Drehen,
 fräsen, schleifen
Spezifikation des Grundwerkstoffes: 1.4313
Werkstückdicke [mm]:
Außendurchmesser: --
Schweißposition: PA, PB
Prüfer oder Prüfstelle:

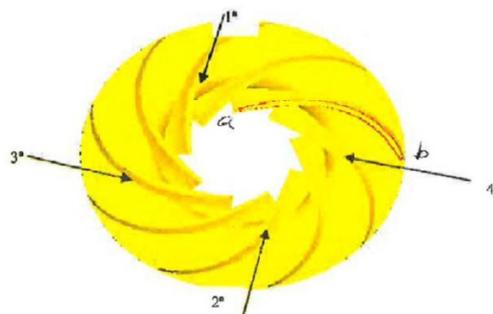
Schweißfolge Heftschweißung:

Wie dargestellt jeweils ~ 3 cm Lang immer gegenüberlegend; Schrumpfung in Axialrichtung von ~ 2mm beim setzen berücksichtigen!



**Wurzelschweißung (Tandem) an 4-gegenüberliegenden Schaufeln (1a-2a; 3a-4a)
 Anschließend fertigestellung der Schweißung an diesen 4 Schaufeln.**

Nun immer gegenüberliegend die Wurzelschweißung sowie die Gegenlage an den Restlichen Schaufeln durchführen, wobei von innen nach Aussen geschweißt werden soll!



*) Falls gefordert

	Geprüft/ Freigegeben:	Revisionsnummer: 01 Verteiler: GF, QM, W
--	--------------------------	---

WURZEL im Durchgeschweißten Bereich MT prüfen!!! → Vor und nach WBH UT Prüfung!!!

Einzelheiten für das Schweißen:

Schweißraupe	Prozeß	Ø Zusatzwerkstoff	Stromstärke Amp	Spannung Volt	Stromart/ Polung	Schweißzusatz	Vorschubgeschwind. ca.	Wärmeeinbringung [kJ/cm]
1+2.	141	2.4mm	120-180	24 -28	- / =	BÖHLER W 13-4 IG		~60
3+4	141	2.4mm	120-200	24 -29	- / =	BÖHLER W 13-4 IG		~60
Ab 5	136	1.2mm	230	30	- / =	Filarc PZ6166		~12

Zusatzwerkstoffe:

Einteilung u. Markenname: Für 141: BÖHLER WIG Stäbe CN 13 4 IG - Ø 2.4mm x 1000mm, (W 13 4 IG nach EN 12072). Für 111: Elektroden BÖHLER FOX CN 13 4, Ø 2.4 + 3.2mm x 350mm lg. (E 13 4 B6 2 nach EN 1600). Für Prozess 136: Fülldraht BÖHLER CN 13/4 MC (F), od. FILARC 6166, Ø 1.2mm

Sondervorschriften für Trocknung: Elektroden ≥3h / 300°C. Fülldraht immer gut verpackt halten, bei angefangenen Rollen für die Lagerung vorgesehene Trockenmittel beifügen und wieder luftdicht verpacken (mit Vakuumpumpe Luft absaugen und verschweißen).

Schutzgas /Schweißpulver: Für 141: MESSER Schweißargon 4.6 (I1 nach EN 439), für 136: MESSER-INOMIX C2 (M12, nach EN 439)

Gasdurchflußmenge: Für 141: 8 – 10l / min. - Wurzelschutz: Keine Zugluft. Für 136: 12 – 14l/min

Wolframelektrodenart / Durchmesser: PLANSEE WC 20 (thoriumfrei, ceriert), 2.4 od. 3.2mm Ø

Schweißbadsicherung: Keine Zugluft

Vorwärmtemperatur: ≥ 100°C max. 140°C

Zwischenlagentemperatur: immer kleiner als 150° C halten

Wärmenachbehandlung und/oder Aushärten: Spannungsarmglühen nach Vorschrift des Stahlherstellers

Erwärmungs- und Abkühlungsrate *: Abdecken nach d. Schweißen, ev. Wasserstoffglühen nach Angaben des Stahlherstellers

Kontaktdüsenabstand: ca. 20mm

Brenneranstellwinkel: wenn es geht 80°

Hersteller:

ZFP Prüfer oder Prüfstelle:

Schweißer:

.....
Name, Datum und Unterschrift

.....
Name, Datum und Unterschrift

*) Falls gefordert

	Geprüft/ Freigegeben:	
--	--------------------------	--

11 Literaturverzeichnis

11.1 Verwendete Literatur

- Arbeitsausschuss NA 092-00-06 AA. „DIN-Fachbericht CENTR 14599“. Beuth Verlag GmbH, August 2005.
- Dilthey, Ulrich. *Schweisstechnische Fertigungsverfahren. 1, 1.*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-33154-9>.
- . *Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen*. Berlin [u.a.]: Springer, 2005.
- . *Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen*. Berlin [u.a.]: Springer, 2005.
- „DIN 1910-100 Schweißen und verwandte Prozesse.PDF“, o. J.
- „Diodenlaser“. Zugegriffen 18. September 2013. <http://www.semibyte.de/wp/graphicslibrary/gl-physics/diodenlaser/>.
- Dubbel, Heinrich. „DUBBEL interaktiv 2.0 das elektronische Taschenbuch für den Maschinenbau ; für Privatnutzer ; mehr als 3000 interaktive Gleichungen, mehr als 9000 Variablenerläuterungen per Mausclick, hochaufgelöste ausdrückbare technische Zeichnungen, umfangreiche Suchmöglichkeiten, neue Themen wie Mechatronik, Bioverfahrenstechnik, Luftfahrzeuge“. Springer, 2002.
- Fahrenwaldt, Hans J, und Volkmar Schuler. *Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung*. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9192-1>.
- „Festkörperlaser - TRUMPF Österreich“. Zugegriffen 17. September 2013. <http://www.at.trumpf.com/produkte/lasertechnik/produkte/festkoerperlaser.html>.
- Fischer, Ulrich. *Tabellenbuch Metall*. Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel, 2011.
- „Fronius International GmbH - Fokus Schweißen - Grundlagen Schweißtechnik“. Zugegriffen 2. August 2014. http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-0AFF0106-BF973F5A/fronius_international/hs.xsl/79_9399_DEU_HTML.htm#.U90sorGKPIU.
- „Fronius International GmbH - Fokus Schweißen - Grundlagen Schweißtechnik“. Zugegriffen 2. August 2014. http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-4AA344EF-0C9BC7B9/fronius_international/hs.xsl/79_817_DEU_HTML.htm#.U9zITrGKPIU.
- Gladkov, E A, A V Maloletkov, und R A Perkovsky. „Automated system for investigating laser welding processes“. *Welding International* 17, Nr. 6 (2003): 476–81. doi:10.1533/wint.2003.3153.
- Grote, Karl-Heinrich, Jörg Feldhusen, Concertgebouw Orchestra of Amsterdam, und Royal Concertgebouw Orchestra. *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*, 2011.
- Hornbogen, Erhard, und Birgit Skrotzki. *Mikro-und Nanoskopie der Werkstoffe*. Auflage: 3. Aufl. 2009. Berlin; Heidelberg: Springer, 2009.
- Inose, Koutarou, Junko Kanbayashi, Daisuke Abe, Naoyuki Matsumoto, und Yasumasa Nakanishi. „Design and welding method for high-strength steel structure using laser-arc hybrid welding“. *Welding in the World*, 29. Juni 2013. doi:10.1007/s40194-013-0064-0.
- Janota, M., und H. Neumann. „Share of Spot Welding and Other Joining Methods in Automotive Production“. *Welding in the World* 52, Nr. 3–4 (1. März 2008): 12–16. doi:10.1007/BF03266625.
- Kodama, S., Y. Ichiyama, Y. Ikuno, und N. Baba. „A Mathematical Model of Short-Circuiting Transfer in the High-Speed Oscillating MAG Process Development of Automatic MAG Welding Machine with Arc Sensor and Its Application to Field Welding of Gas Pipelines“. *Welding in the World* 48, Nr. 7–8 (1. Juli 2004): 27–34. doi:10.1007/BF03266440.

- Läpple, Volker. *Werkstofftechnik Maschinenbau theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen ; [neue europäische und internationale Normen]*. Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer, 2013.
- „Messer | Schweiß- und Schneidgase“. Zugegriffen 2. August 2014. http://www.messergroup.com/de/Produkte_und_Loesungen/gase/schweissgase/index.html.
- Normenausschuss Schweißtechnik (NAS). „Norm DIN 1910-100 02.2008“. Beuth Verlag GmbH, Februar 2008.
- . „Norm DIN 1912 Teil 4 05.1981“. Beuth Verlag GmbH, Mai 1981.
- . „Norm DIN EN 14610“. Beuth Verlag GmbH, Februar 2005.
- Normenausschuss Technische Grundlagen (NATG). „Norm DIN 8580“. Beuth Verlag GmbH, September 2003.
- . „Norm DIN 8593 Teil 0 09.2003“. Beuth Verlag GmbH, September 2003.
- . „Norm DIN 8593 Teil 6 09.2003“. Beuth Verlag GmbH, September 2003.
- Quiroz, Vanessa, A. Gumenyuk, und Michael Rethmeier. „Comparison Between Co₂ — and Nd:Yag-Laser Beam Welding of High-Strength Crmnni Steels for the Automotive Industry“. *Welding in the World* 56, Nr. 11–12 (1. November 2012): 129–42. doi:10.1007/BF03321403.
- Ramakrishnan, M., und V. Muthupandi. „Application of Submerged Arc Welding Technology with Cold Wire Addition for Drum Shell Long Seam Butt Welds of Pressure Vessel Components“. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 65, Nr. 5–8 (1. März 2013): 945–56. doi:10.1007/s00170-012-4230-0.
- Ravner, Harold, E. R. Russ, und C. O. Timmons. „Antioxidant Action of Metals and Metal-Organic Salts in Fluoroesters and Polyphenyl Ethers.“ *Journal of Chemical & Engineering Data* 8, Nr. 4 (1. Oktober 1963): 591–96. doi:10.1021/jc60019a036.
- „Schweißen Tabellen und Diagramme > Anleitungen und Tipps“. Zugegriffen 6. August 2014. <http://www.anleitung-zum-schweissen.de/schweissen-tabellen-und-diagramme/>.
- „Schweißzellen“. *schweisstechnik.at*. Zugegriffen 19. August 2014. <http://www.schweisstechnik.at/category/257/schweiszellen>.
- Tarn, Tzyh-Jong, Shan-Ben Chen, und Changjiu Zhou. *Robotic Welding, Intelligence and Automation*. Springer Science & Business Media, 2007.
- „Tiefschweißen - TRUMPF Deutschland“. Zugegriffen 17. September 2013. <http://www.de.trumpf.com/produkte/lasertechnik/loesungen/anwendungsfelder/laserschweissen/tiefschweissen.html>.

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der Fertigungsverfahren	4
Abbildung 2: Gliederung Metallschweißen	6
Abbildung 3: Schweißtechnisches Dreieck.....	7
Abbildung 4: Nahtpositionen.....	8
Abbildung 5: Stoßarten.....	9
Abbildung 6: Überblick der Schweißnahtformen.....	11
Abbildung 7: p-T-Diagramm eines Einstoff-Systems mit beschrifteten Phasen.....	12
Abbildung 8: Zustandsdiagramm eines Zweikomponentensystems	14
Abbildung 9: Kristallseigerung	15
Abbildung 10: Eutektikum, Abkühlungskurven und Zustandsdiagramm einer im flüssigen Zustand vollkommen mischbarem, aber nicht im festen Zustand eines binärem System	17
Abbildung 11: Gesamtes Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm mit den Glühfarben im Hintergrund.....	18
Abbildung 12: Gitterstrukturen von Eisen	19
Abbildung 13: Gefügeänderung in Abhängigkeit des Temperaturverlaufes	21
Abbildung 14: Entstehungsorte der Risse innerhalb der WEZ	22
Abbildung 15: Entstehung von Erstarrungsrissen (links) und von Aufschmelzrissen (rechts)	23
Abbildung 16: Entstehung von Aufhärtungsrissen.....	24
Abbildung 17: Wasserstoffinduzierte Kaltrisse	26
Abbildung 18: mikroskopische Sicht auf ein Fischauge in einer Schweißnaht	27
Abbildung 19: Konstruktive Maßnahmen zur Vermeidung von Terrassenbrüchen....	28
Abbildung 20: Einschlüsse, Poren und Risse	29
Abbildung 21: Schutzgasschweißen.....	31
Abbildung 22: Schema WIG	32
Abbildung 23: Verbildlichung des Gleichrichtereffektes bei WIG-Wechselstrom (Polung der Elektrode eingetragen).....	35
Abbildung 24: Hochspannungsimpulse zur Neuzündung	36
Abbildung 25: Schema des WIG-Plasmaschweißens	36
Abbildung 26: Plasmastrahlschweißen WPS und Plasmalichtbogenschweißen WPL	37
Abbildung 27: Gegenüberstellung: Kurzlichtbogen zu Sprühlichtbogen	44
Abbildung 28: Kräfte im Lichtbogenraum	45
Abbildung 29: Hochgeschwindigkeits-Aufnahme eines rotierenden Lichtbogens der Firma Messer	46
Abbildung 30: Schema CTM-Verfahren - Fronius.....	49
Abbildung 31: Stumpfnah zwei Aluminium Bleche - Fronius	50

Abbildung 32: konventionelle Bauform eines Schutzgas MAG-Brenners	50
Abbildung 33: Analoge elektronisch geregelte Stromquelle	52
Abbildung 34: Laserstrahl in Relation zu dem Licht einer Glühbirne	55
Abbildung 35: Schematischer Aufbau eines Lasers	56
Abbildung 36: Längsströmender CO ₂ -Laser.....	59
Abbildung 37: Quergeströmter CO ₂ -Laser.....	60
Abbildung 38: Energieabsorption	61
Abbildung 39: Tiefschweißen (Firma Trumpf).....	62
Abbildung 40: CO ₂ -Laser-Schweißkopf (Firma Trumpf)	62
Abbildung 41: Nd:YAG- Laser	63
Abbildung 42: Scheibenlaser der Firma Trumpf	64
Abbildung 43: Aufbau einer Fokussieroptik.....	67
Abbildung 44: Spiegel- und Fokussieroptiken	68
Abbildung 45: Strahlführungssystem.....	68
Abbildung 46: Remote-Laserschweißen der Firma Trumpf	69
Abbildung 47: Francis Laufrad.....	70
Abbildung 48: Beispiel einer Heftschweißung	72
Abbildung 49: Magnetpulverprüfung.....	72
Abbildung 50: Einständer-Drehkipptisch und ein Orbital-Drehkipptisch	78
Abbildung 51: Bahnschweißroboter in der Knickbauweise	79
Abbildung 52: Struktur einer Robotersteuerung	80
Abbildung 53: Taktile Sensor	84
Abbildung 54: Lichtbogensensor	84
Abbildung 55: Triangulation.....	85
Abbildung 56: Prinzip eines Laserscannersensors.....	86
Abbildung 57: Lichtschnittverfahren	86
Abbildung 58: Mobile Schweißzelle der Firma Lorch zum MAG-Schweißen.....	87
Abbildung 59: Schweißzelle der Firma Lorch	91
Abbildung 60: Schema einer Laseranlage.....	92

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schweißen und verwandte Prozesse - Schweißpositionen (ISO 6947:2011); Deutsche Fassung EN ISO 6947:2011	8
Tabelle 2: Übersicht einiger Stoßarten mit passenden Nahtarten und Fugenformen	10
Tabelle 3: Vorwärmtemperatur in Abhängigkeit des Kohlenstoffgehaltes	25
Tabelle 4: Wahrscheinlichkeit der Bildung von Aufhärtungsrisen in Abhängigkeit von Höchststärke und Martensitgehalt.....	26
Tabelle 5: Laserarten	57

14 Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
d.h.	das heißt
Ebd.	ebenda
etc.	et cetera
exkl.	exklusive
ibid	Auf der zuvor genannten Seite
i.d.R	in der Regel
inkl.	Inklusive
lt.	laut
MAGC	Metall-Aktivgasschweißen mit Kohlendioxid
MAGM	Metall-Aktivgasschweißen mit Mischgasen
Min.	Minuten
o.g.	oben genannt
rd.	rund
Sek.	Sekunden
Std.	Stunden
Stk.	Stück
tlw.	teilweise
u.a.	unter anderem
UP-Schweißen	Unterpulverschweißen
vgl.	vergleiche
WIG	Wolfram-Inert-Gasschweißen
z.B.	zum Beispiel